

**Aalto-yliopisto**  
**Sähkötekniikan korkeakoulu**

**Sähkötekniikan laitos**

Oskari Niiranen

**Suntin käyttö virta-anturina raskaissa työkonesähkökäytöissä**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa, 25.11.2013.

**Työn valvoja:**

Prof. Marko Hinkkanen

**Työn ohjaaja:**

DI Aarne Friman

Tekijä:	Oskari Niiranen		
Työn nimi:	Suntin käyttö virta-anturina raskaissa työkonesähkökäytöissä		
Päivämäärä:	25.11.2013	Kieli: suomi	Sivumäärä: 9+81
Laitos:	Sähkötekniikan laitos		
Professuuri:	S-81 Tehoelektroniikka		
Työn valvoja:	Prof. Marko Hinkkanen, Aalto-yliopisto		
Työn ohjaaja:	DI Aarne Friman, ABB Oy		
<p>Tässä työssä tutkitaan suntin käyttöä virta-anturina raskaiden työkoneiden suuri-virtaisissa tasasähkömuuttajissa ja vaihto- ja tasasuuntaajissa. Tutkittavassa suntissa on kaksi eri mittauselektroniikkapiiriä, joiden suorituskykyä verrataan kompensoimattomaan Hall-anturiin. Työn teoriaosuudessa esitellään Hall-anturien ja suntin toimintaperiaatteet. Lisäksi teoriaosuudessa käsitellään virtatiedon käyttöä muun muassa moottorisäädössä. Työssä esitellään myös virta-anturien epäideaalisuuksia ja niiden vaikutuksia tahtikoneen momenttisäätöön. Mittaustulosten perusteella Hall-anturi on hieman sunttia parempi staattisessa suorituskyvyssä, mutta suntin staattinen suorituskyky on kuitenkin hyvä. Hall-anturi toimii hyvin myös dynaamisissa mittauksissa. Suntin dynaaminen suorituskyky on huono testatuissa dynaamisissa tilanteissa, mutta ilman lisätutkimuksia ei voida lopullisesti todeta dynaamisen suorituskyvyn olevan huono. Suntti vaikuttaa kuitenkin siltä, että siinä on jatkokehityspotentiaalia. Mittaukset tehtiin laboratorio-olosuhteissa. Tämä työ ei ota kantaa anturien toiminnasta todellisen tehoelektroniikkamoduulin häiriöisessä ympäristössä.</p>			
Avainsanat:	Ajoneuvosähkökäyttö, suntti, taajuusmuuttaja, tasasähkömuuttaja, työkonesähkökäyttö, virta-anturi		

**AALTO UNIVERSITY  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING**

**ABSTRACT OF  
THE MASTER'S  
THESIS**

Author:	Oskari Niiranen		
Name of the thesis:	Using Shunt Resistor as a Current Transducer in Heavy-Duty Mobile Machine Drives		
Date:	25.11.2013	Language: Finnish	Number of pages: 9+81
Department:	Department of Electrical Engineering		
Professorship:	S-81 Power Electronics		
Supervisor:	Prof. Marko Hinkkanen, Aalto University		
Instructor:	M. Sc. (Tech.) Aarne Friman, ABB Oy		
<p>This thesis investigates using a shunt resistor as a current transducer in the DC-DC converters, rectifiers and inverters of high-current heavy-duty mobile machine drives. There are two different measurement electronic circuits attached to the shunt. The performance of the shunt and these circuits are compared with an open-loop Hall sensor. This thesis describes the operating principle of Hall sensors and current shunts. In addition, the use of measured current in e.g. motor control is discussed. Moreover, this thesis discusses the non-idealities of current sensors and their effects on the torque control of synchronous machines. The measurements indicate that the Hall sensor is slightly better than the shunt in the static performance measurements. However, the shunt is almost as good as the Hall sensor. The Hall sensor performs well in the dynamic measurements. On the contrary, the performance of the shunt is poor. However, additional measurements are needed to confirm this. Anyhow, the shunt seems to be a potential current sensor for further development. All measurements were done in laboratory conditions. Therefore, this thesis does not investigate the performance of the current transducers in a true environment, which is a power electronic module where there are severe electromagnetic interferences.</p>			
Keywords:	Automotive drive, current sensor, current transducer, DC-DC converter, frequency converter, mobile machine drive		

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Drivesin High Power Drives -tulosyksikölle. Suuret kiitokset diplomityöaiheesta ABB Drivesille ja ohjaajalleni Aarne Frimanille. Kiitän Aarne Frimania myös työn ohjaamisesta. Suuri kiitos työni valvojalle Marko Hinkkaselle, joka jaksoi perehtyä työn etenemiseen kuukausittain ja joka antoi paljon työtä ja kirjoittajaa hyödyttävää palautetta. Kiitän myös Jukka-Pekka Kittilää hänen näkemyksistään työn tekniseen puoleen ja mittauksiin. Kiitokset työn tarkkaavaisesta lukemisesta Nina Lagukselle, jonka ansiosta moni pikkuvirhe tuli huomatuksi. Kiitän myös Etteplania FPGA-kortin lainasta ja sen käytön ohjeistuksesta.

Espoossa 25.11.2013

Oskari Niiranen

# Sisällysluettelo

Alkusanat .....	IV
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet .....	VII
1 Johdanto .....	1
2 Sähkökäyttö .....	4
2.1 Raskaat ajoneuvo- ja työkonesähkökäytöt .....	4
2.2 Vaihto- ja tasasuuntaaja sekä tasasähkömuuttaja .....	7
2.3 Mitatun virtatiedon käyttö .....	9
2.3.1 Virtatiedon käyttö moottorisäädössä .....	10
2.3.2 Virtatiedon käyttö tasasähkömuuttajan säädössä .....	13
2.3.3 Muu virtatiedon käyttö .....	14
2.4 Virta-anturien toimintaympäristö .....	15
3 Virta-anturit .....	18
3.1 Virta-anturien suorituskyvyn määrittäminen .....	18
3.2 Hall-anturien teoria .....	22
3.2.1 Magnetismi .....	23
3.2.2 Hall-ilmiö .....	25
3.3 Hall-anturi .....	27
3.3.1 Kompensoimaton Hall-anturi .....	28
3.3.2 Kompensoitu Hall-anturi .....	30
3.4 Suntti .....	32
3.5 Muita virta-anturityyppejä .....	35
3.6 Mittaussignaalin käsittely ja mittauselektroniikka .....	37
3.7 Anturien epäideaalisuuksien vaikutuksia .....	42
4 Tutkittavat virta-anturit .....	46
4.1 Virta-anturille asetettava vaatimukset .....	46
4.2 Tutkittavat virta-anturit .....	48
5 Mittaukset .....	52
5.1 Staattisen suorituskyvyn mittausjärjestelyt .....	52
5.2 Dynaamisen suorituskyvyn mittausjärjestelyt .....	55
5.3 Yleisiä havaintoja mittaustuloksista .....	58
5.4 Staattisen suorituskyvyn mittaustulokset .....	58
5.4.1 Nollapistepoikkeama käyttölämpötilan funktiona .....	58

5.4.2	Lineaarisuus- ja vahvistusvirhe .....	60
5.4.3	Epätasaisen lämpenemän aiheuttama nollapistepoikkeama.....	64
5.4.4	Staattisten virheiden vaikutus moottorisäätöön .....	65
5.5	Dynaamisen suorituskyvyn mittaustulokset .....	66
5.6	Tulosten yhteenveto .....	71
6	Yhteenveto .....	73
	Lähdeluettelo .....	75
	Liite A: Mittalaitteet .....	77

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

$A$	Sydämen poikkipinta-ala
$B$	Magneettivuon tiheys
$B_r$	Remanenssivuon tiheys
$D$	Harvennussuhde (decimation ratio)
$d$	Hall-elementin johteen paksuus
$e$	Elektronin varaus
$f_{BW}$	Kaistanleveys, ylärajataajuus
$f_D$	AD-muunnoksen harvennuksen näytteistystaajuus
$F_L$	Lorentzin voima
$F_m$	Magnetomotorinen voima
$f_s$	$\Delta\Sigma$ -modulaattorin näytteistystaajuus
$G_e$	Vahvistusvirhekerroin
$G_{error}$	Lineaarisuusvirheen sovitussuoran kulmakerroin
$H, H$	Magneettikenttä, magneettikentän voimakkuus
$h_A, h_B, h_C$	Kytkinmallin kytkimet
$\Delta I, \Delta I_P$	Virranmittausvirhe
$i_A, i_B, i_C$	Vaihtosuuntaajan vaihevirratt
$I_C$	Hall-elementin ohjausvirta
$I_{offset}$	Vahvistus- ja lineaarisuusmittauksista kompensoitu nollapistepoikkeama
$i_{ref}, I_{ref}$	Referenssivirta mittauksissa
$I_{ref,ge}$	Lineaarisuusvirheen sovitussuora
$i_s^s, i_s$	Staatrorivirtavektori staatrori- ja roottorikoordinaatistossa
$i_{s,fb}$	Kompensointivirta
$i_{s,ge}$	Vahvistusvirheen aiheuttama virhevirtavektori
$i_{s,oe}$	Nollapistepoikkeaman aiheuttama virhevirtavektori
$i_{si}$	Fluxgate-elementin virtavaste
$i_L$	Kuristimen virta
$i_M, I_M$	Virta-anturin näyttämä
$I_{max}$	Virranmittausalueen positiivinen maksimiarvo
$I_{min}$	Virranmittausalueen negatiivinen maksimiarvo
$i_N, \hat{I}_N$	Nimellisvirta: RMS-arvo, huippuarvo
$i_P, I_P$	Mitattava virta, ensiövirta
$i_{sd}, i_{sq}$	Staatrorivirtavektorin d- ja q-komponentit

$K$	Hall-vakio
$l$	Sydämen kehän pituus
$L_{sd}, L_{sq}$	Staattori-induktanssin d- ja q-komponentit
$N$	Johdinkierrosten lukumäärä
$n$	Pyörimisnopeus
$p$	Napapariluku
$P_{sh}$	Suntin häviöteho
$R_H$	Hall-elementin ominaisresistanssi
$R_{kuorma}$	Dynaamisen mittausjärjestelyn kuormavastus
$R_M$	Mittausvastus
$R_m, R_{m0}, R_{m1}$	Magneettinen reluktanssi, ilmapälin reluktanssi, ferriitin reluktanssi
$R_s$	Staattoriresistanssi
$R_{sh}$	Suntin resistanssi
$S_{ms}$	Digitaalinen mittaussignaali
$\Delta T$	Suntin terminaalien välinen lämpötilaero
$T_e$	Tahtikoneen vääntömomentti
$t_{va}, t_{na}, t_{ra}$	Vasteaika, nousuaika, reagointiaika
$u_{AB}, u_{BA}, u_{CA}$	Vaihtosuuntaajan pääjännitteet
$u_{DC+}$	Jännitevälipiirin pluskiskon potentiaali
$u_{DC-}$	Jännitevälipiirin miinuskiskon potentiaali
$U_H$	Hall-jännite
$u_i$	Indusoitunut jännite
$u_L$	Kuristimen jännite
$u_M$	Virta-anturin lähtöjännite
$\underline{u}_n, \mathbf{u}_n$	Jännitevektori $n$
$U_{OH}$	Hall-elementin nollapistepoikkeamajännite
$U_S$	Käyttöjännite
$\mathbf{u}_s^s, \mathbf{u}_s$	Staattorijännitevektori staattori- ja roottorikoordinaatistossa
$u_{sh}$	Suntin jännitehäviö
$u_{si}$	Fluxgate-elementin jänniteheräte
$v$	Nopeus
$\delta$	Tahtikoneen staattori- ja roottorivuovektorien välinen kulma
$\vartheta$	Tahtikoneen roottorin kulma
$\mu, \mu_0, \mu_r$	Permeabiliteetti, tyhjiön permeabiliteetti, suhteellinen permeabiliteetti
$\phi$	Magneettivuo



$\phi_r$	Remanenssivuo
$\phi_p$	Magneettiirin primäärivuo
$\phi_{s,fb}$	Kompensointivirran synnyttämä kompensointimagneettivuo
$\phi_{si}$	Fluxgate-elementin virran synnyttämä magneettivuo
$\psi_{PM}^s, \psi_{PM}$	Kestomagneettien vuo (kestomagneettikoneen roottorivuo)
$\psi_s^s, \psi_s$	Staattorivuovektori staattori- ja roottorikoordinaatistossa
$\psi_{sd}, \psi_{sq}$	Staattorivuovektorin d- ja q-komponentit
$\omega_m$	Sähkökulmanopeus
A-suntti	Prototyypisuntti alkuperäisellä mittauselektronikalla
CAN	Automaatioväylä (controller area network)
DTC	Suora käämivuon ja vääntömomentin säätö (direct torque control)
IGBT	Bipolaaritransistori eristetyllä hilalla (insulated gate bipolar transistor)
LVDS	Matalajännitteinen differentiaalinen digitaalisignaali (low voltage differential signaling)
P-suntti	Prototyypisuntti kolmannen osapuolen prototyypielektronikalla

# 1 Johdanto

Energiatehokkuuden lisääminen ja päästöjen vähentäminen ovat nykyään merkittäviä valintoja ohjaavia tekijöitä yhteiskunnan jokaisella osa-alueella. Tämä näkyy muun muassa sähköajoneuvoteknologian kehitysvauhdin kasvussa. Erityisesti raskaissa ajoneuvoissa ja työkoneissa ollaan siirtymässä sähkö- ja hybridisähköjärjestelmiin energiatehokkuuden kasvattamiseksi ja käyttö- ja polttoainekustannusten pienentämiseksi. Lisäksi sähkömoottorit ovat suorituskyvyltään polttomoottoreita parempia monissa ajoneuvojen ja työkoneiden sovelluksissa. Tästä seuraa luonnollisesti se, että tehoelektroniikka tulee merkittäväksi osaksi sähköistä voimansiirtoa.

Raskaita ajoneuvoja, joissa on potentiaalia joko täyssähkö- tai hybridisähkötoteutukseen, ovat linja-autot ja työkoneet. Työkoneilla tarkoitetaan esimerkiksi tunneliporia, kauhakuormajia, metsäkoneita, traktoreita ja maatalouskoneita. Tässä työssä keskitytään raskaiden hybridisähköjärjestelmien sähköisen voimansiirron moottoreiden säätöjärjestelmiin ja akunhallintajärjestelmiin, jotka on toteutettu tehoelektroniikalla. Näitä järjestelmiä ovat tasa- ja vaihtosuuntaajat ja tasasähkökatkojat.

Moottorisäätö tehoelektroniikkaa hyödyntävillä taajuusmuuttajilla on teollisuudessa hyvin tunnettua tekniikkaa. Työkonesähkökäytöt kuitenkin eroavat merkittävästi teollisuuskäytöistä. Yleisiä eroja ovat muun muassa kuormituksen syklistyys, tehon suunnan jatkuva muuttuminen, energiavarastojen käyttö ja hyötysuhteeltaan ja tehotehdydeltään hyvien tahtikoneiden, kuten esimerkiksi kestopagneettivasteisten reluktanssimoottoreiden, käyttö. Toki jotkin teollisuuskäytötkin ovat ominaisuuksiltaan edellä mainittujen kaltaisia, mutta ajoneuvokäyttöille mainitut ominaisuudet ovat perusominaisuuksia. Lisäksi työkoneille on ominaista moottoreiden käyttö pienillä pyörimisnopeuksilla ja maksimimomentilla. Toisin sanoen vaihtosuuntaajan lähtötaajuus on pieni ja virta suuri. Usein voidaan tarvita täyttä momenttia jopa nollanopeudella suhteellisen pitkiä aikoja, mikä kuormittaa tehoelektroniikkakomponentteja hyvin epätasaisesti. Tässä työssä keskitytään työkonesähkökäyttöihin, sillä ne asettavat virtaantureille niin kovat vaatimukset, että esimerkiksi linja-auton sähkökäytön virtaanturivaatimukset täyttyvät mikäli työkonevaatimukset täytetään.

Suunnittelun lähtökohta on luonnollisesti saada aikaiseksi voimansiirto, joka on halpa, luotettava, suorituskyykyinen ja riittävän tiivis, jotta se mahtuu pieneen tilaan. Tyypillinen toimintaympäristö sähköiselle ajoneuvovoimansiirrolle on vaativa. Ympäristön lämpötila tehoelektroniikkamoduulien sisällä vaihtelee rajusti jopa  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$  välillä ja esimerkiksi päävirtakiskojen lämpötilat voivat nousta reilusti yli sadan asteen. Lisäksi sähköjärjestelmällä välitettävä teho on luonteeltaan hyvin syklaavaa ja tehon kulkusuunta voi muuttua jatkuvasti. Usein työkoneissa vaihtosuuntaajan lähtötaajuus on hyvin matala ja virta suuri, jolloin moottori pyörii hitaasti täydellä vääntömomentilla. Tämä on etenkin liikeanturittoman säädön kannalta haastava tilanne. Lisähaasteena ovat sovelluskohteiden aiheuttama värinä ja mahdolliset kaasumaiset kemikaalit, joita

esiintyy paljon esimerkiksi kaivoksissa. Kaikki nämä edellä mainitut seikat asettavat kovia vaatimuksia kaikille sähkökäytön komponenteille mekaanisista osista elektronikka- ja tehoelektronikkakomponentteihin.

Moottorisäädön kannalta on tärkeää, että sen tarvitsemat suureet tunnetaan riittävän tarkasti. Sääto tarvitsee tiedon moottorin tuottamasta vääntömomentista, säätötavasta riippuen staattori- tai roottorivuosta ja moottorin pyörimisnopeudesta. Nykyään pyritään käyttämään liikeanturitonta säätöä, mikä edelleen kiristää jännitteiden ja virtojen mittausten tarkkuusvaatimuksia. Tämän työn kannalta mitattu virtatieto on tärkein suure.

Hyvän virranmittauksen toteutus ei ole nykyään kovinkaan haastavaa, jos anturien toimintaympäristö on riittävän suotuista. Jos käyttöympäristö on todella vaativa, on virranmittauksen suunnittelu ja virta-anturien valinta haastavaa. Tässä diplomityössä tutkitaan virranmittausmenetelmää raskaiden ajoneuvo- ja työkonēsähkökäyttöjen tehoelektronikan vaatimuksiin. Tarkoitus on tutkia erästä sunttivirta-anturia, jonka tulisi sopia sellaisenaan tai hieman muokaten pienjännitteisiin (alle 1000 V<sub>AC</sub> ja alle 1500 V<sub>DC</sub>) tasa- ja vaihtosuuntaajaan ja näistä moduuleista sovellettuihin kaksisuuntaisiin täyssiltatasasähkömuuttajiin. Pienellä muokkauksella tarkoitetaan esimerkiksi pienivirtaiseen laitteeseen soveltuvan virta-anturin käyttöä kahden anturin rinnankytkentänä suurivirtaisessa laitteessa. Virta-anturin on mitattava virtaa, jonka suuruus on jopa 900 A<sub>RMS</sub>. Lisäksi Virta-anturin on mitattava sekä tasavirtaa että vaihtovirtaa, jonka sinimuotoinen perusaalto on 0 - 1000 Hz. Perusaallon lisäksi virrassa on paljon yliaaltoja, mikä on vaihtosuuntaajalle tyypillistä. Virta-anturin kaistanleveysvaatimus on vähintään 30 kHz, mutta on hyvä kyetä mittaamaan virtaa aina 80 kHz:n taajuuteen asti. Lisäksi virta-anturin tulee suoriutua häiriintymättä dynaamisista tilanteista, joissa virta muuttuu hyvin nopeasti. Toisin sanoen virta-anturin on pysyttävä stabiilina myös esimerkiksi kaapeliheijastuksien aiheuttamissa värähtelyissä, joiden taajuus on jopa kymmenien megahertsien luokkaa.

Tässä työssä tehdään erilaisia staattisen ja dynaamisen suorituskyvyn mittauksia sunttivirta-anturille ja eräälle kompensoimattomalle Hall-anturille. Sunttivirta-anturissa käytetään kahta eri mittauselektronikkaa. Tutkittavaa sunttivirta-anturia verrataan mainittuun Hall-anturiin. Kompensoimaton Hall-anturi kykenee toimimaan vaaditussa ympäristössä, mutta sillä on tiettyjä rajoituksia tarkkuuden, kaistanleveyden, mittausalueen ja mekaanisen rakenteen kannalta. Tämän työn tarkoituksena on tutkia, onko suntti vaihtoehto Hall-anturille. Tarkoitus ei ole löytää lopullista ratkaisua virranmittauskonseptiin, vaan tehdä alustava katsaus suntin käyttöön. Työn tulosten perusteella päätetään kannattaako sunttia alkaa tutkia mahdollisena virta-anturina ajoneuvo- ja työkonēsähkökäytöissä. Tutkittavia suorituskykyyn liittyviä asioita ovat dynaaminen suorituskyky, lineaarisuus, nollapistevirhe, vahvistusvirhe ja epätasaisen lämpenemän aiheuttamat virheet. Edellä mainittuja ominaisuuksia tutkitaan koko vaaditulla lämpötila-alueella: ympäristö -40 °C - +90 °C ja lähtövirtakiskosto -40 °C - +105 °C.

Työn alussa luvussa 2 esitellään tämän työn kannalta oleelliset sähkökäytön komponentit, joita ovat taajuusmuuttaja ja tasasähkömuuttaja. Lisäksi luvussa 2 havainnollistetaan miten taajuusmuuttaja ja tasasähkömuuttaja liittyvät hybridisähköjärjestelmien voimansiirtoon ja esitellään raskaiden työkonien ja ajoneuvojen sähkökäyttöä yleisesti. Luvussa 3 esitellään virtamuuntimiin liittyvää teoriaa ja Hall-anturien ja sunttianturien toimintaperiaatteet. Tässä työssä vertaillaan erästä sunttia erääseen kompensoimattomaan Hall-anturiin. Kompensoitua Hall-anturia ei tässä työssä tutkita, mutta se on kuitenkin niin yleinen virta-anturityyppi suuritehoisissa taajuusmuuttajissa, että sen toimintaperiaate esitellään. Luvussa 3 tarkastellaan lisäksi virta-anturien epäideaalisuuksia ja niiden vaikutuksia moottorisäätöön. Myös  $\Delta\Sigma$ -modulaatioon perustuva AD-muunnos esitellään luvussa 3, sillä se on virta-antureille hyvin sopiva häiriösietoinen AD-muunnosperiaate. Luvussa 4 esitellään tutkittavat virta-anturit ja asetetaan niille suorituskykyvaatimukset. Luvussa 5 esitellään tutkimuksissa käytetyt mittaussj järjestelyt ja mittaustulokset. Lisäksi luvussa 5 pohditaan jatkotutkimustarpeita.

## 2 Sähkökäyttö

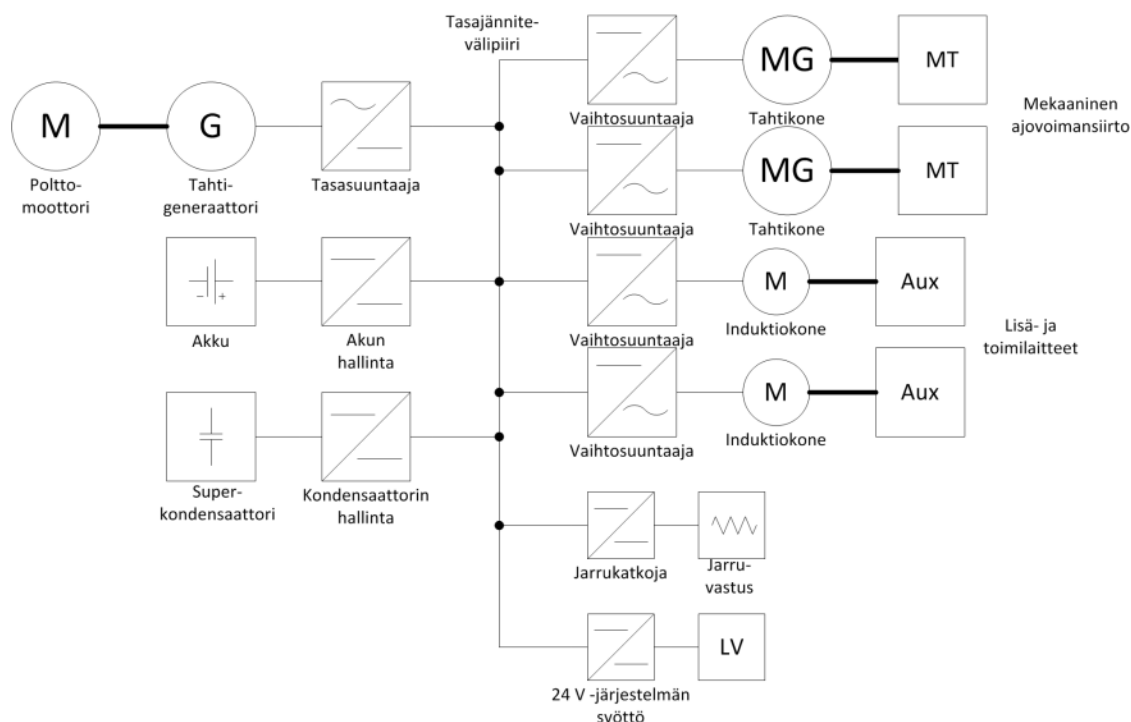
Sähkökäyttö on järjestelmä, joka muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Esimerkiksi veden pumppaamiseen käytetty pumppua ohjaava järjestelmä on sähkökäyttö. Sähkökäyttöön kuuluvia komponentteja ovat muun muassa muuntaja, taajuusmuuttaja, sähkömoottori ja mahdollisesti myös tasasähkökatkoja ja mekaaninen vaihde. Muunnettava sähköenergia saadaan yleensä kolmivaiheisesta sähköverkosta, mutta esimerkiksi ajoneuvoissa energianlähteenä voi olla generaattori, akku tai superkondensaattori. Sähkökäyttöillä voidaan myös muuttaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Tuuliturbiini on tästä hyvä esimerkki; sähkökäyttö muuttaa mekaanisen pyörimisliikkeen sähköenergiaksi.

Edellä mainittuja sähkökäyttöjen käyttötapoja voidaan käyttää samassa järjestelmässä. Toisin sanoen sähkökäytön tehon suunta voidaan muuttaa. Esimerkiksi sähköajoneuvon sähkökäytön päätarkoitus on muuntaa polttomoottorin mekaaninen energia tai akkuun varastoitunut sähköenergia ajoneuvoa liikuttavaksi energiaksi. Toisaalta ajoneuvon liike-energia voidaan ottaa jarrutuksessa talteen muuntamalla mekaaninen liike sähkökäytön avulla akkuun varastoitavaksi tasasähköksi.

Tässä luvussa esitellään perusasiat raskaista ajoneuvo- ja työkonesähkökäytöistä. Lisäksi tässä luvussa esitellään tämän diplomityön kannalta oleelliset sähkökäytön pääkomponentit ja niiden toimintaperiaatteet. Nämä komponentit ovat vaihto- ja tasasuuntaaja sekä tasasähkömuuttaja. Virta-antureihin liittyen esitellään virtatiedon käyttö muun muassa tasasähkökatkojen ja moottorin säädössä. Lisäksi tässä luvussa tarkastellaan virta-anturien toimintaympäristöä.

### 2.1 Raskaat ajoneuvo- ja työkonesähkökäytöt

Raskailla ajoneuvo- ja työkonesähkökäyttöillä tarkoitetaan esimerkiksi linja-autojen ja työkoneiden hybridisähkövoimansiirtoa. Kuten jo johdannossa mainittiin, nämä voimansiirtojärjestelmät eroavat usealla eri tavalla perinteisistä teollisuuskäytöistä. Erot ovat niin käyttötavoissa kuin toimintaympäristössä. Tässä luvussa esitellään käytön rakennetta ja toimintaperiaatetta. Toimintaympäristöä käsitellään tarkemmin luvussa 2.4.



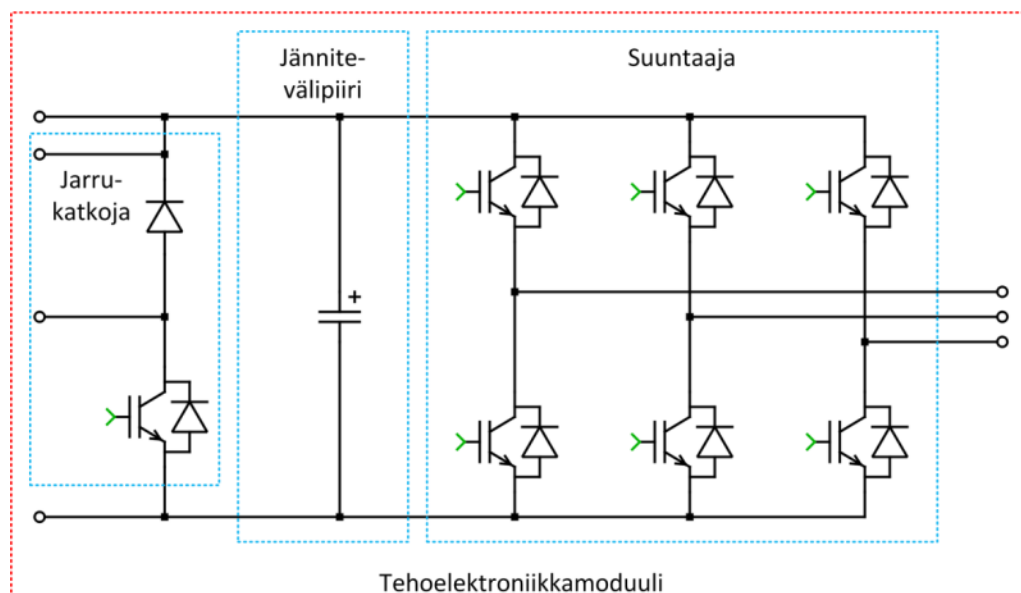
Kuva 1: Esimerkki työkonēsähkökäytöstä (sarjahybridi)

Tyypillisesti raskaat ajoneuvot ja työkoneet ovat sarjahybridejä [1]. Esimerkki sarjahybridisähkökäytöstä on esitetty kuvassa 1. On huomioitava, että kaikkia kuvan komponentteja ei välttämättä käytetä, ja toisaalta komponentteja voi olla enemmänkin. Tässä esimerkissä polttomoottori pyörittää tahtigeneraattoria, jonka kolmivaiheinen vaihtosähkö tasasuunnataan järjestelmän jännitevälipiiriin. Tahtigeneraattori toimii myös käynnistyksen yhteydessä polttomoottorin starttimoottorina [2]. Tasasähköpiiriin voidaan kytkeä useita vaihtosuuntaajia, jotka ohjaavat eri moottoreita. Kuvan 1 esimerkissä kaksi erillistä vaihtosuuntaajaa ohjaavat tahtimoottoreita, jotka ovat työkonen ajomoottoreita. Lisäksi välipiiriin on kytketty kaksi induktiomootoria, jotka voivat ohjata esimerkiksi suoraan jotakin liikettä, tai ne voivat pyörittää hydraulikkapumppuja hydraulisen voimansiirron tarpeen mukaan. Välipiiriin on kytketty tasasähkömuuttajien välityksellä akku ja superkondensaattori. Lisäksi välipiiristä tehdään galvaanisesti erottavalla tasasähkömuuttajalla käyttöjännite pienjännitejärjestelmään. Tehotarpeen mukaan pienjännitteen tuottava tasasähkömuuttaja on esimerkiksi push-pull -hakkuri, joka voi olla integroituna esimerkiksi vaihtosuuntaajamoduulin ohjaus-elektroniikkaan. Pienjännitejärjestelmää syöttävä tehoelektroniikka ei ole tämän työn kannalta oleellinen, joten sitä ei tämän tarkemmin käsitellä.

Polttomoottori toimii ensisijaisena tehonlähteenä. Akkua ja superkondensaattoria voi käyttää hetkellisesti huipputehon tuottamiseen. Akkua voi myös käyttää jonkin aikaa ilman, että polttomoottoria tarvitaan. Järjestelmästä riippuen käytössä on joko akku tai superkondensaattori. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää molempia. Jarrutusenergia voidaan ottaa talteen akkuun tai superkondensaattoriin ajomoottoreita ohjaavien vaihtosuuntaajien avulla ohjaamalla vääntömomentti pyörimissuuntaan nähden vastakaiseksi. [2] Toisin sanoen vaihtosuuntaajia käytetään tällöin ohjattuina tasasuuntaajina.

Kuvassa 1 esitetty sähkökäyttö voidaan toteuttaa myös ilman energiavarastoa, mutta se ei silloin ole hybridi, sillä tehonlähteitä on vain yksi. Eräs esimerkki energiavarastotomasta sähkökäytöstä on niin sanottu dieselsähköinen voimansiirto, jota käytetään jonkin verran työkoneissa, mutta niiden pääasiallinen käyttökohde on perinteisesti ollut diesel-sähkövetureiden suurjännitteinen voimansiirto. Jarrutusenergian talteenotto ei ole tässä tapauksessa mahdollista, joten jarrutusenergia ohjataan jarrukatkojan avulla jarruvastukseen.

Tämän työn kannalta oleellimmat kuvan 1 komponentit ovat tasa- ja vaihtosuuntaaja ja akun tai kondensaattorin hallintaan käytetty tasasähkömuuttaja. Kuvassa 2 on esitetty yleinen tehoelektroniikkamoduuli, joka voi toimia kaikkina edellä mainittuina komponentteina. Suuntaaja toimii vaihtosuuntaajana silloin, kun se ohjaa moottoria, ja tasasuuntaajana silloin kun se jarruttaa moottoria tai syöttää generaattorin tehoa välipiiriin. Suuntaaja toimii tasasähkömuuttajana silloin, kun se siirtää energiaa välipiirin ja energiavaraston välillä. Vaikka kuvassa 1 jarrukatkoja on piirretty erilleen vaihtosuuntaajamoduuleista, on se tyypillisesti integroitu kuvan 2 mukaisesti yhteen tai useampaan vaihtosuuntausmoduuliin. Jarrukatkoja voidaan liittää erillisillä liittimillä ulkoiseen jarruvastukseen, johon ylimääräinen energia voidaan tarvittaessa ohjata. Tasasuuntaus- ja tasasähkökatkojamoduuleissa ei yleensä ole jarrukatkoja, sillä niiden toiminnan näkökulmasta jarrukatkoja tarvitaan vain välipiirin ylijännitesuojaukseen. Yleensä vaihtosuuntaajien pitkäaikaiselle jarrutukselle mitoitettut jarrukatkojat riittävät suojaksi.



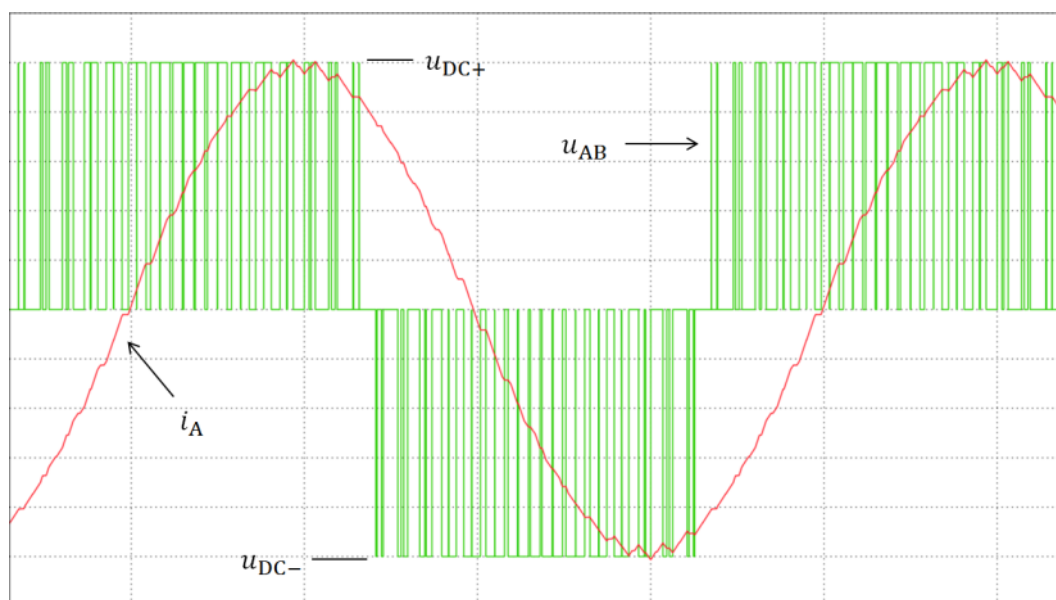
Kuva 2: Yleinen tehoelektroniikkamoduuli. Oikealla moottori- ja energiavarasto-liittimet, vasemmalla välipiiri- ja jarruvastusliittimet.

Kuvan 2 moduulin eräs etu on se, että se voi toimia samalla rakenteella kaikissa toimintatiloissa (vaihto- ja tasasuuntaaja ja tasasähkömuuttaja). Käytännössä ero on suuntaajan IGBT-siltojen käyttötavassa, joka voidaan määritellä ohjelmistolla. Ainoat mekaaniset muutokset liittyvät jarrukatkojan käyttöön ja tasasähkömuuttajan

tarvitsemiin kuristimiin. Jarrukatkoja mahtuu yleensä moduuliin, sillä se on vain yksi IGBT-silta ja tarvittavat kiskostot. Sen sijaan kuristimet on lisättävä moduulin ulkopuolelle niiden suuren koon takia. Kuvan 2 moduulin toimintamallit esitellään seuraavassa luvussa lyhyesti.

## 2.2 Vaihto- ja tasasuuntaaja sekä tasasähkömuuttaja

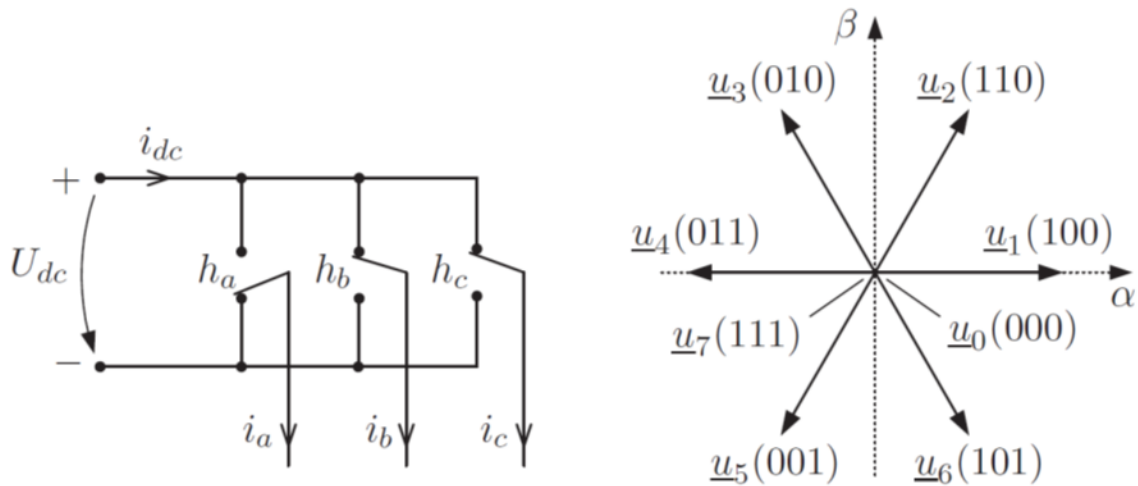
Vaihtosuuntaaja on laite, joka muuttaa tasasähkön halutun taajuiseksi kolmivaiheiseksi vaihtosähköksi. Tasasuuntaaja muuttaa verkon tai dieselgeneraattorin kolmivaiheisen vaihtosähkön tasasähköksi. Jännitevälipiirissä on kondensaattoreita, jotka toimivat energiavarastoina vaihtosuuntaajalle. Vaihtosuuntaaja muuttaa tasasähkön jälleen vaihtosähköksi. Vaihtosuuntaaja voi toimia myös ohjattuna tasasuuntaajana, mikä mahdollistaa moottorin hallitun jarruttamisen sähköisesti. Myös generaattorin tasasuuntaaja voi toimia ohjattuna, mutta sitä voidaan käyttää myös ohjaamattomana tasasuuntaajana, jolloin välipiirin jännitettä tai generaattorin vääntömomenttia ei voida säätää tasasuuntaajalla.



Kuva 3: Vaihtosuuntaajan A-vaiheen virta  $i_A$  ja pääjännite  $u_{AB}$

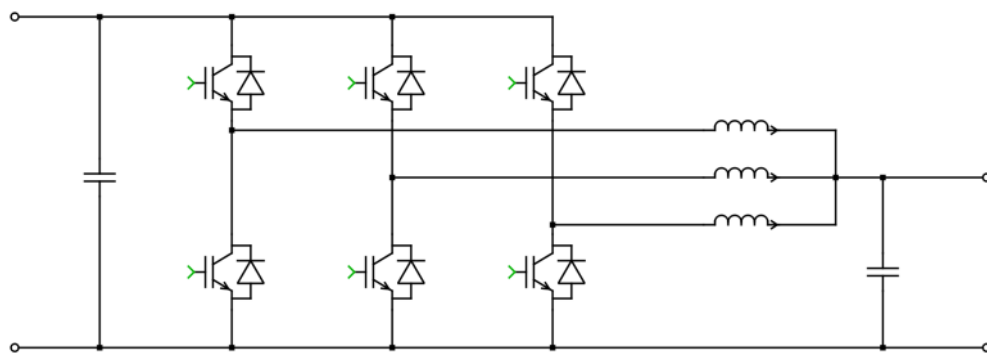
Vaihtosuuntaajan IGBT-kytkimiä ohjataan niin, että moottoriin staattoriin saadaan pyörivä magneettikenttä. Kuvassa 3 on esitetty taajuusmuuttajan A- ja B-vaiheiden välinen pääjännite  $u_{AB}$  ja yhden vaiheen virta. Pääjännite on kantiaaltomaista, mutta virta  $i_A$  on lähes sinimuotoista lähtösuodattimen, moottoripiirin tai sähköverkon induktanssin ansiosta. Virrassa nähdään kuitenkin yliaaltojen aiheuttamaa rippeliä, joka johtuu yliaaltosuodatuksen epäideaalisuuksista. Lähtöjännite syntyy kytkeällä kuvan 4 kytkinmallin kytkimiä niin, että voidaan toteuttaa haluttu lähtöjännitevektori. Kuvan 4 kytkimet ovat asennoissa  $++$  (tai 011) muodostaen vektorin  $\underline{u}_4$ . Avaruusvektoriallia hyödynnetään vektorisäädössä ja sen johdannaisissa.





Kuva 4: Vaihtosuuntaajan kytkinmalli (vas.) ja avaruusvektorit (oik.) [3]

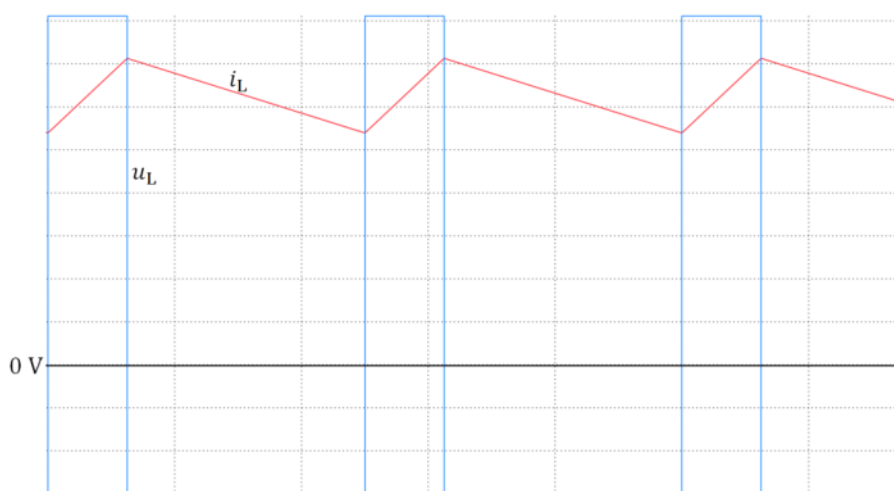
Kuvassa 5 on esitetty kolmivaiheinen puolisolttatasasähkökatkoja. Jokainen vaihe yksinään muodostaa kaksisuuntaisen tasasähkömuuttajan, joka voi toimia ylempiä IGBT-kytkimiä ohjaamalla laskevana katkojana (engl. buck) ja alempia IGBT-kytkimiä ohjaamalla nostavana katkojana (engl. boost). Käyttämättömät IGBT:t pidetään johtamattomina pitämällä niiden hila-emitterijännitteet negatiivisina. Kolmella vaiheella toteutetulla katkojalla voidaan vähentää lähtövirtarippeliä ohjaamalla vaiheita  $120^\circ$  vaihesiirroissa toisiinsa nähden. Kolmivaiheinen puolisolttasuuntaaja on tyypillinen tasa-sähkömuuttajatorologia varsinkin suuritehoisissa ajoneuvo- ja työkonessähkökäytöissä. Vaiheiden määrä ei ole rajattu kolmeen, vaan niitä voi olla teoriassa yhdestä ääretömään saakka. Kolmivaiheinen topologia on järkevä valinta luvussa 2.1 esitellyn teho-elektroniikkamoduulin topologian johdosta, sillä samalla moduulilla voidaan ohjelmistomuutoksella toteuttaa helposti erilainen toiminta. Tasasähkömuuttajaa käytetään akun tai superkondensaattorin hallintaan, sillä tämän tyyppisten energia-varastojen kytkeminen suoraan välipiiriin on yleensä hankalaa. Tämä johtuu siitä, että akun ja superkondensaattorin jännitteet ovat yleensä eritasoisia, minkä lisäksi varsinkin akun latausvirta on kyettävä hallitsemaan hyvin tarkasti. On toki olemassa järjestelmiä, joissa akku on kytketty suoraan välipiiriin.



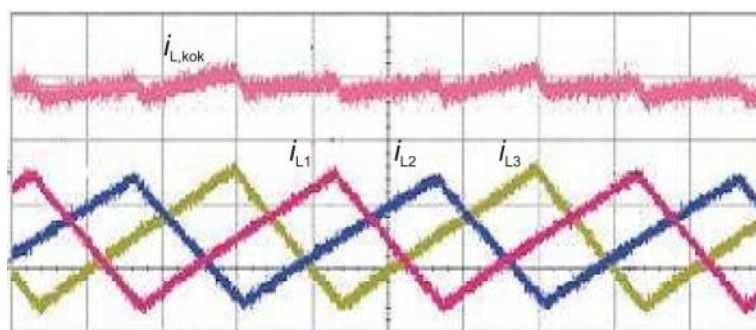
Kuva 5: Kolmivaiheinen puolisolttatasasähkökatkoja

Kuten aiemmin mainittiin, tulee tasasähkömuuttajaan kytkeä ulkoinen kuristinmoduuli, jotta jännitettä laskeva ja nostava toiminta ovat mahdollisia. Kuvassa 5 kuristimien oikealla puolella on joko akku tai superkondensaattori. Nämä toimivat pääasiassa energiavarastoina, mutta ne mahdollistavat myös hakkurin toiminnan. Suuntaajasilta ja sen vasemmalla puolella oleva jännitevälipiiri ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin vaihto- ja tasasuuntaajien vastaavat osat.

Tarkastellaan kaksisuuntaisen tasasähkömuuttajan yhden vaiheen kuristimen jännitettä ja virtaa. Kuva 6 esittää kuristimen jännitteen  $u_L$  ja virran  $i_L$  jatkuvalla kuristinvirran toiminta-alueella. Kuva pätee nostavalle ja laskevalle toiminnalle, sillä molemmissa tapauksissa kuristimen virta riippuu kuormasta ja kuristimen yli olevien positiivisten ja negatiivisten jännitepulssien kestoajoista ja amplitudeista. Kolmivaiheisessa toiminnassa kolme kuristinvirtaa summautuvat kuristimien tähtipisteessä johtaen pienempään rippelivirtaan, kuten kuvasta 7 nähdään.



Kuva 6: Tasasähkömuuttajan yhden vaiheen kuristimen virta ja jännite

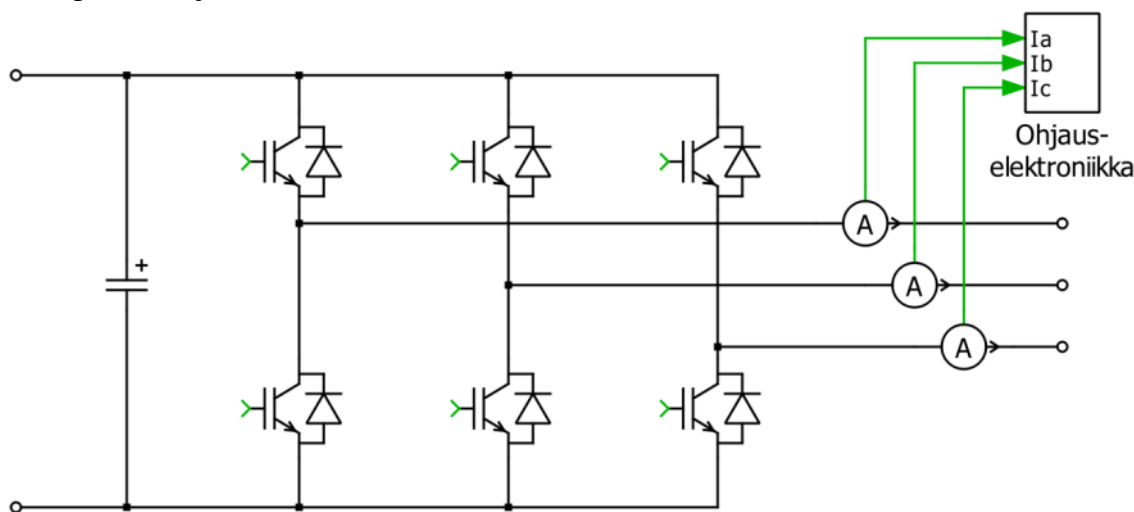


Kuva 7: Vaihevirtojen summautuminen kolmivaiheisessa tasasähkömuuttajassa [4]

## 2.3 Mitatun virtatiedon käyttö

Virtamittaus tehdään tämän työn sovelluksissa aina samasta pisteestä tasasuuntaus-, vaihtosuuntaus- tai tasasähkömuuttajamoduulissa. Osasyynä on aiemmin mainittu

moduulien rakenteen vastaavuus, mutta myös virtasäätö- ja suojaustekijät vaikuttavat tähän. Virranmittaus toteutetaan tasa- ja vaihtosuuntaajan vaihtosähköpuolelta lähtökiskojen virranmittauksena ennen moottorikaapeliliittimiä, tai tasasähkökatkojen alajännitepuolelta IGBT-siltojen ja kuristimien kaapeleiden lähtöliittimien välistä kuvan 8 mukaisesti. Toisin sanoen virta-anturit sijaitsevat aina moduulin sisällä IGBT-siltojen keskipisteiden jälkeen ennen lähtövirtaliittimiä.

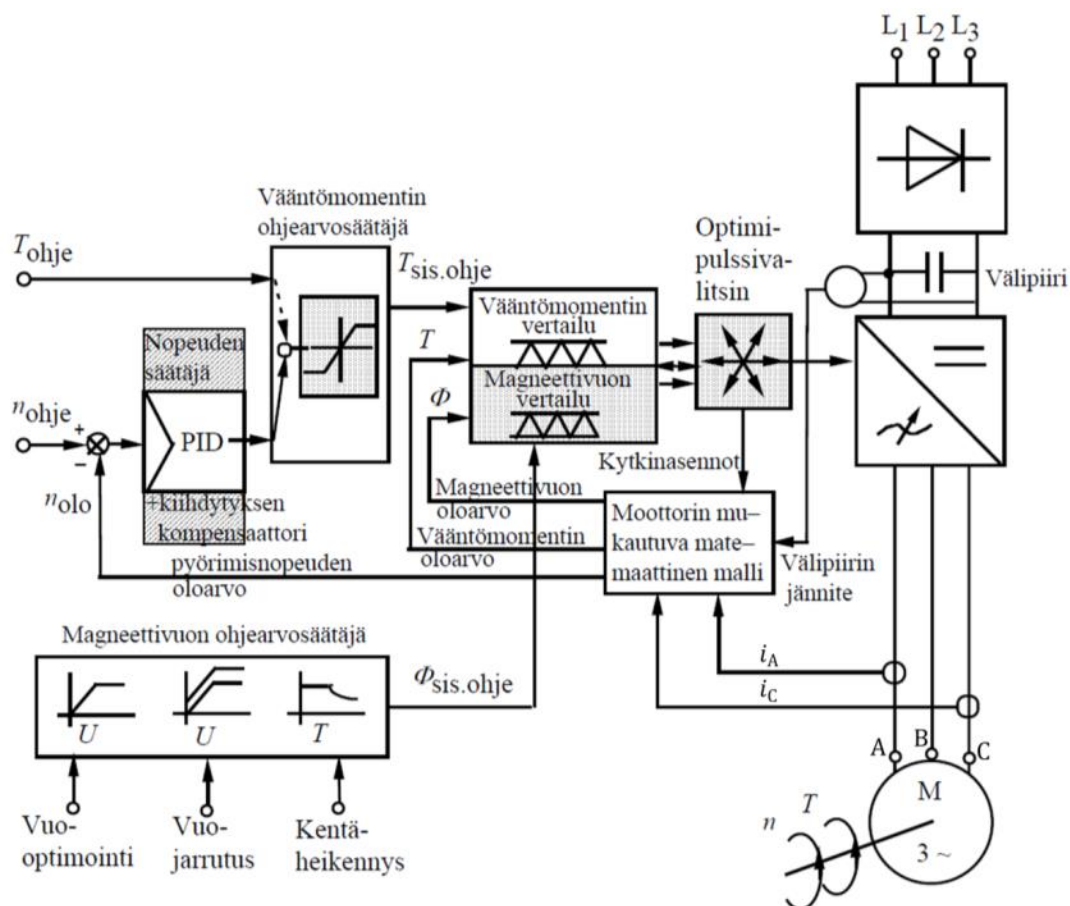


Kuva 8: Virranmittauksen toteutus

Virtatiedon ensisijainen tarkoitus on moottorisäätö ja tasasähkömuuttajan säätö. Näiden lisäksi virtatietoa käytetään myös erilaisiin suojus- ja valvontatarkoituksiin. Moottorivirta tai akkujen latausvirta kiinnostavat yleensä sähkökäytön käyttäjääkin, sillä virtojen, taajuuksien, nopeuksien ja jännitteiden tunteminen antaa yleensä kokeneelle käyttäjälle hyvän yleiskuvan järjestelmän tilasta ja suorituskyvystä. Luvuissa 2.3.1 - 2.3.3 on esitelty virranmittauksen pääasialliset käyttötarkoitukset.

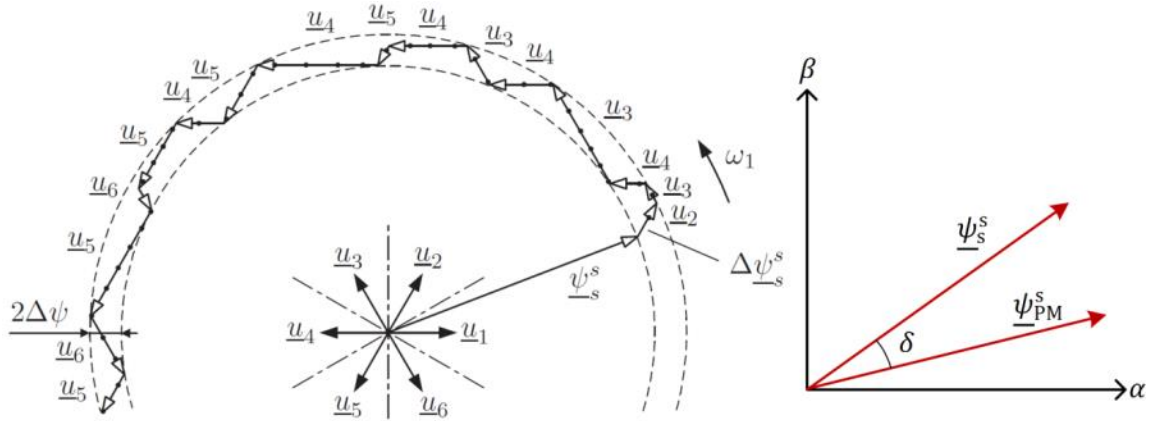
### 2.3.1 Virtatiedon käyttö moottorisäädössä

Vaihtosuuntaajan päätehtävä on vaihtosähkömoottorin nopeuden ja vääntömomentin säätö. Erilaisia säätömenetelmiä on useita, mutta tämän työn kannalta oleellisin on suora käämivuon ja vääntömomentin säätö (engl. direct torque control, DTC) tahtikoneiden näkökulmasta. DTC on eräs vektorisäädön muoto, joka on perinteistä vektorisäätöä huomattavasti nopeampi. Vektorisäädössä mitatut jännite- ja virtasuureet muutetaan moottorimallin avulla haluttuun koordinaatistoon, jotta moottorisäätö voi käyttää niitä hyödyksi. Moottorimalli estimoi moottorin nopeuden ja vääntömomentin mitattujen suureiden avulla. Vuo- ja momenttisäädön avulla vektorimodulaattori valitsee sopivat vaihtosuuntaajan kytkinasennot. [5] Säätöjärjestelmä voi käyttää myös nopeusmittausta suoraan moottorin akselilta, mutta nopeusanturi kasvattaa järjestelmän hintaa ja vähentää luotettavuutta. Yleensä pyritään käyttämään nopeusanturitonta säätöä, sillä se on työkonikäytöissä toivottu menetelmä sen edullisuuden ja luotettavuuden vuoksi. Tämä pätee myös useille teollisuuskäyttöille.



Kuva 9: DTC:n lohkokaaavio (muokattu lähteestä [6])

Tässä työssä esitellään yksinkertaisuuden vuoksi perinteinen DTC, vaikka nykyään DTC-säädössä on paljon vektorisäädön piirteitä. Hystereesisäätötyyppisen DTC:n eräs haittapuoli on muun muassa IGBT-moduuleille aiheutuvat rajut käyttötilanteet. Tästä syystä DTC:tä ei käytetä enää puhtaasti hystereesisäätönä. Kuvassa 9 on esitetty nopeusanturittoman DTC:n lohkokaaavio. Nopeussäätö vertaa estimoitua nopeutta nopeusreferenssiin ja muodostaa momenttireferenssin momenttisäätimelle. Momenttisäädin tarkkailee saamaansa momenttireferenssiä estäen esimerkiksi momenttirajojen ylittämisen [7]. Momentti- ja vuokomparaattorit toteuttavat varsinaisen käämivuon ja vääntömomentin suoran ohjaamisen. Molemmat toimivat hystereesisäädön kaltaisina komparaattoreina saaden toteutettavan referenssiarvon ja moottorimallin estimoidun oloarvon sisäänmenoinaan. Näin momentin ja vuon tila pystytään määrittämään, ja pulssinvalitsimella valitaan optimaalisin avaruusvektori.



Kuva 10: Staattorivuon reitti

Kuva 10 havainnollistaa DTC:n toimintaperiaatetta. Staattorivuovektoria  $\underline{\psi}_s^s$  kuljetetaan hystereesisrajojen sisäpuolella kuvan esimerkissä vastapäivään. Moottorisäätöyhtälöissä yläindeksi s viittaa staattorikoordinaatistoon. Yläindeksittömät suureet ovat roottorikoordinaatistossa. Kuvassa nähdään käytetyt avaruusvektorit (pisteet kuvaavat nollavektoreita 000 ja 111). Jotta moottori tuottaisi vääntömomenttia, on staattorivuovektorin  $\underline{\psi}_s^s$  ja roottorivuovektorin  $\underline{\psi}_{PM}^s$  välisen kulman  $\delta$  oltava erisuuri kuin nolla. Vääntömomentin säätö tapahtuu säätämällä staattorivuovektorin kulmaa suhteessa roottorin kulmaan. Vuosäädössä taas säädetään staattorivuovektorin amplitudia. Muutostilanteissa voidaan poiketa hystereesisrajojen sisäpuolelle, jos vääntömomenttia tarvitsee muuttaa erittäin nopeasti. [3] [8]

Jännitemallia käytettäessä DTC tarvitsee tiedon vääntömomentista ja staattorivuosta. Staattorivuo staattorikoordinaatistossa on

$$\underline{\psi}_s^s = \int (\underline{u}_s^s - R_s \underline{i}_s^s) dt, \quad (1)$$

jossa  $\underline{u}_s^s$  on staattorijännitevektori,  $\underline{i}_s^s$  on staattorivirtavektori ja  $R_s$  on staattoriresistanssi. Jännitevektori lasketaan tasajännitevälipiirin jännitteestä ja kytkinten tiloista. Virtavektori

$$\underline{i}_s^s = \frac{2}{3} \left( i_a e^{j0} + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (2)$$

koostuu vaihevirroista  $i_a$ ,  $i_b$  ja  $i_c$ , jotka ovat  $120^\circ$  vaihesiirrossa toisiinsa nähden. [3] [9]

Jännitemalli on hyvä suurilla nopeuksilla ja transienttilanteissa, mutta pienillä nopeuksilla jännitemalli on huono. Jos käytetään lisäksi vuoyhtälöitä roottorikoordinaatistossa, saavutetaan parempi suorituskyky pienillä nopeuksilla pysyvässä tilassa, sillä tällä menetelmällä voidaan kompensoida jännitemallin aiheuttamaa staattorivuovektorin ajautumista, jota käsitellään lyhyesti luvussa 3.7. Kuitenkaan transient-

titilanteisiin tämä ei tuo lopullista ratkaisua. Vuoyhtälöissä staattorivuo esitetään roottorikoordinaatistossa virtojen ja induktanssien avulla. Kestomagneettikoneen staattorivuo on

$$\boldsymbol{\psi}_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq}, \quad (3)$$

jonka d- ja q-komponentin voidaan esittää muodossa

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd}i_{sd} + \psi_{PM} \\ \psi_{sq} = L_{sq}i_{sq} \end{cases}, \quad (4)$$

jossa  $\psi_{PM}$  on kestopagneettien vuo ja  $L_{sd}$  ja  $L_{sq}$  ovat staattori-induktanssit. Eräs virtamallin ongelma on se, että säätö tarvitsee tiedon roottorin kulmasta voidakseen tehdä muunnoksen staattori- ja roottorikoordinaatiston välillä. [9] Tätä havainnollistavat koordinaatistomuunnosyhtälöt

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s^s = \boldsymbol{\psi}_s e^{j\vartheta} \\ \boldsymbol{u}_s^s = \boldsymbol{u}_s e^{j\vartheta} \\ \boldsymbol{i}_s^s = \boldsymbol{i}_s e^{j\vartheta} \end{cases}, \quad (5)$$

joissa yläindeksittömät suureet ovat roottorikoordinaatistossa, ja yläindeksillä s merkityt suureet ovat staattorikoordinaatistossa.  $\vartheta$  on roottori- ja staattorikoordinaatistojen välinen kulma. Toisin sanoen se on roottorin asento. Kulmaa  $\vartheta$  ei pidä sekoittaa kulmaan  $\delta$ , joka on staattori- ja roottorivuovektorien välinen kulma. Yhteys roottorin sähkökulmanopeuden ja roottorin kulman välillä on [10]

$$\omega_m = \frac{d\vartheta}{dt}. \quad (6)$$

Tahtikoneen vääntömomentti on

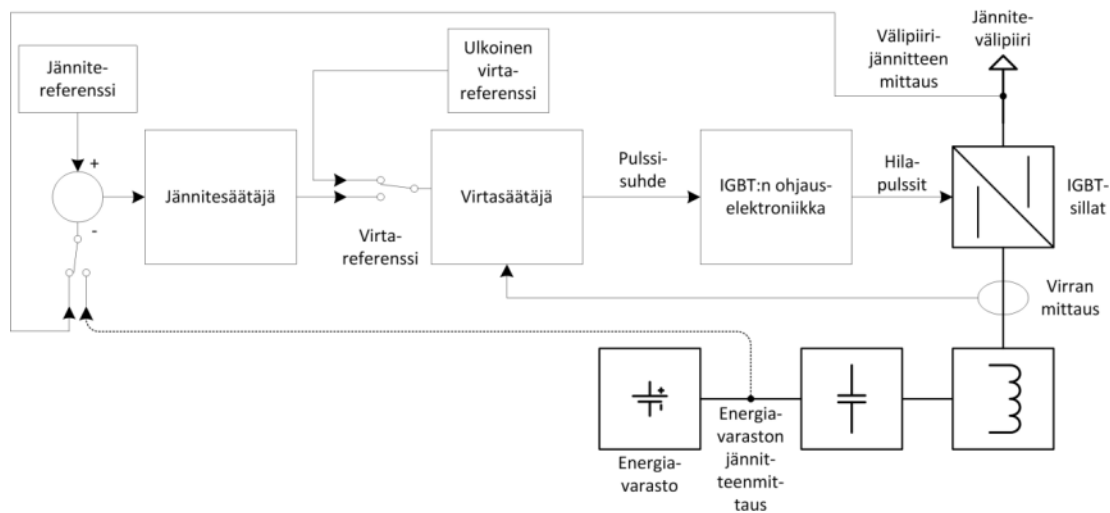
$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} p \text{Im}\{\boldsymbol{i}_s^s \boldsymbol{\psi}_s^s\} \\ &= \frac{3}{4} \frac{p |\boldsymbol{\psi}_s^s|}{L_{sd} L_{sq}} (2 |\boldsymbol{\psi}_{PM}^s| L_{sq} \sin(\delta) - |\boldsymbol{\psi}_s^s| (L_{sq} - L_{sd}) \sin(2\delta)), \end{aligned} \quad (7)$$

jossa  $p$  on moottorin napapariluku. Vääntömomentin yhtälö on esitetty staattorikoordinaatistossa, mutta se pätee myös roottorikoordinaatistossa. [3] [8] [11]

### 2.3.2 Virtatiedon käyttö tasasähkömuuttajan säädössä

Tasasähkömuuttajaa ohjataan tyypillisesti virtasäädöllä, kun sitä käytetään akun tai superkondensaattorin lataamiseen. Tällöin virtaohje tulee esimerkiksi akkuhallinta-

järjestelmältä CAN-väylää pitkin. Varsinkin akun hallinnassa virtasäädön merkitys on suuri, sillä esimerkiksi litiumioniakun ylilataaminen voi johtaa akun räjähtämiseen. Kun energiaa syötetään taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin, voidaan käyttää jännite- tai virtasäätöä. Jännitesäätöä käytetään silloin, kun järjestelmässä ei ole generaattoria tai sitä ei käytetä. Jos generaattoria käytetään, sen tasasuuntaaja hoitaa yleensä välipiirin jännitesäädön. Tällöin tasasähkömuuttajaa käytetään virtasäädöllä.



Kuva 11: Tasasähkökatkojan virtasäädön lohkokaavio

Kuvassa 11 on esitetty virtasäädön lohkokaavio. Säättötopologia on kaskadisäätö, jonka ulompana silmukkana on jännitesäätö ja sisempänä silmukkana virtasäätö. Jännitesäätäjä valitsee mittaustiedon toimintatilan mukaan. Virtasäätäjän referenssi tulee joko jännitesäätäjältä tai ulkoisena ohjeena esimerkiksi akunhallintajärjestelmältä. Jälkimmäisessä tapauksessa kuvan 11 jännitesäätäjää ei käytetä. Virtasäätäjä määrittää virran ohjearvon ja mitatun virran perusteella pulssisuhteen, joka välitetään IGBT-kytkimien ohjauselektronikalle. Kuten aiemmin kuvassa 8 esitettiin, virranmittaus tapahtuu tasasähkökatkojan alajännitepuolelta siten, että jokaisen vaiheen kuristimien virrat mitataan. Mittauspiste on sama riippumatta tehon kulkusuunnasta.

Yleisimmät virtasäätömenetelmät ovat virran keskiarvosäätö, huippuvirtasäätö, vakio-off-aika -säätö, hystereesissäätö ja säätömenetelmä, jossa päällekytkentätaajuus on vakio. Keskiarvo- ja huippuarvosäädön kytkentätaajuudet ovat vakiot. Sen sijaan muissa säätömenetelmissä kytkentätaajuudet vaihtelevat. [4] [12] [13] Monivaiheisissa tasasähkömuuttajissa on järkevää käyttää vakiokytkentätaajuisia menetelmiä, jotta vaihe-siirrot ja summautuvat rippelivirrat pysyvät halutuissa arvoissa. Myös virtasäätäjän näytteistystaajuus voi olla pienempi, ja siten myös laskentakapasiteetti voi olla pienempi.

### 2.3.3 Muu virtatiedon käyttö

Virta-anturi voidaan asentaa myös jännitevälipiiriin niin, että se mittaa tehoelektronikkamoduuliin menevää tai sieltä tulevaa virtaa. Yleensä mitataan tasasähkövälipiirin

jännite useaa eri tarkoitusta varten. Virta- ja jännitetietoa voi käyttää eri moduulien välisen tehon- ja energiansiirron laskemiseen. Esimerkiksi sarjahybridissä, jossa on generaattori, akku ja yksi vaihtosuuntaaja ja moottori, voisi tehonlaskennan virta-anturi olla tasasuuntausmoduulin tasasähkölähtökiskoissa, akun hallintaan käytetyn tasasähkömuuttajan yläjännitepuolen lähtökiskoissa tai vaihtosuuntaajamoduulin tasasähkökiskoissa. [14]

Virranmittausta voidaan käyttää myös erilaisiin valvonta- ja suojaustoimintoihin. Vaikka esimerkiksi vaihtosuuntaajan lähtövirroista vain kahta vaihetta käytetään moottorisäätöön<sup>1</sup>, mitataan myös kolmas vaihe. Tällöin voidaan virtojen epäsymmetrioiden kautta havaita muun muassa maasulkuvikoja ja vaihejohtimen irtoaminen. Lisäksi virranmittauksella voidaan havaita ylivirtatilanteet. Ylivirran aiheuttaa moottorin ylikuormitus tai suuri-impedanssinen oikosulku. On mahdollista, että ylikuormitus sallitaan hetkellisesti, jolloin virta-anturin vasteajalle ei tule lisävaatimuksia moottorisäätöön nähden. Periaatteessa nopeita virta-antureita voitaisiin hyödyntää jäykkien oikosulkujen havaitsemiseen, mutta varsinkin suuritehoisissa sovelluksissa voidaan käyttää IGBT:n saturaatiovalvontaa tai vastaavaa takaisinkytkentää oikosulkujen havaitsemiseen. Oikosulkuvalvonnassa virta-anturin vasteajan tulisi olla hyvin nopea, mutta ylivirtavalvonnan tavoin tarkkuus ei ole kriittinen tekijä.

Virranmittauksella on myös välillisesti merkitystä nykyään tärkeäksi osaksi suuntaaja-tekniikkaan tulleen toiminnallisen turvallisuuden kannalta (engl. functional safety). Standardit määrittävät muun muassa useita erilaisia nopeusvalvontaan liittyviä turvatoimintoja, jotka vaativat tietenkin tarkkaa nopeusmittausta tai -estimointia. Tällöin jo tahtikoneen säädönkin kannalta oleellinen asentoestimaatin tarkkuus saa lisämerkitystä, sillä jos mittausvirhe on suuri, voi siitä aiheutua virheellisiä turvatoimintojen aktivointeja tai vaaratilanteita. Toki tämä korostuu enemmän epätahtikoneilla, sillä virheellinen asentoestimaatti johtaa tahtikoneilla ennemmin momenttisäädön ongelmiin kuin nopeuden karkaamiseen. Eräs hyvä esimerkki on nopeusturvarajoituksen (engl. safely limited speed, SLS) käyttö. Eräs tapa toteuttaa kaksikanavainen nopeudenvalvonta on käyttää yhtenä nopeustietona moottorisäädön laskemaa estimaattia, ja toisena nopeustietona voidaan käyttää jonkin ulkoisen turvalaitteen antamaa nopeusestimaattia tai -mittausta.

## 2.4 Virta-anturien toimintaympäristö

Raskaat työkonesähkökäytöt asettavat suuria haasteita niin virta-antureille kuin tehoelektroniikallekin. Tyypillisesti raskaan työkonesähkökäytön tehoelektroniikka-moduulit ovat ahtaita, kuumia ja häiriöisiä. Virta-anturien näkökulmasta häiriöillä

---

<sup>1</sup> Myös kolmea vaihevirran mittausta voitaisiin käyttää moottorisäädössä. Anturien epäsymmetrioista johtuen moottorisäätö saa ristiriitaista tietoa virta-antureilta. Kolmella vaihevirtamittauksella ristiriitojen merkitys on suurempi kuin kahdella. [32]

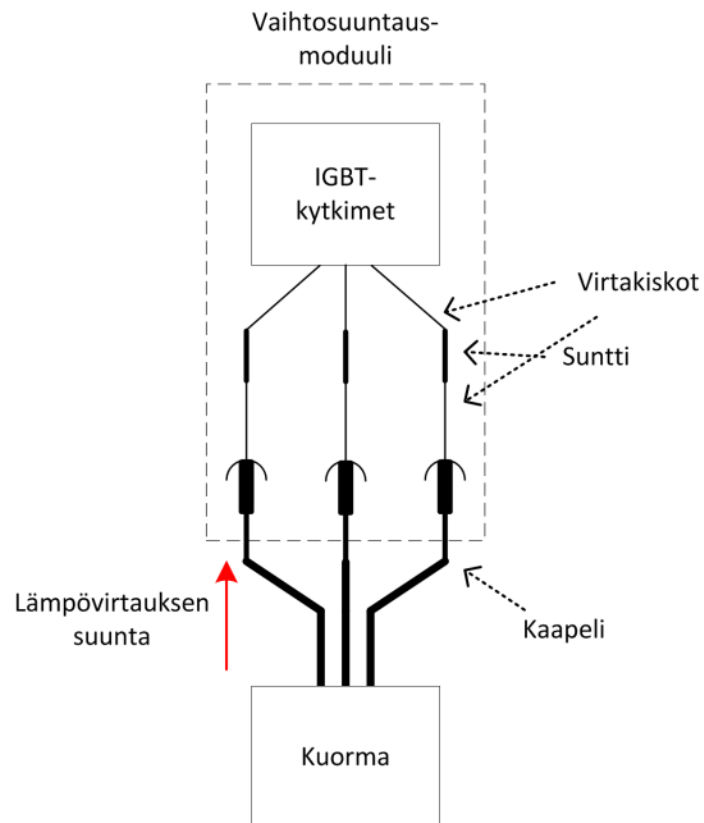


tarkoitetaan suurista virroista ja virtojen ja jännitteiden nopeista muutoksista johtuvia sähkö- ja magneettikenttien muutoksia. Lisäksi moduulit altistuvat voimakkaalle värinälle, erilaisille kemikaaleille ja koville lämpötilanvaihteluille. Ympäristö on vaativa virta-anturien toiminnalle, ja anturien tulisi toimia tarkasti koko laitteen elinkaaren ajan.

Tehoelektroniikan käyttöön liittyy voimakkaat sähkömagneettiset kentät. Tehoelektroniikkamoduuli altistuu ulkopuolisille sähkömagneettisille häiriöille, mutta pahimmat häiriöt tulevat tehoelektroniikkamoduulista itsestään. Virta-antureihin vaikuttavat häiriöt aiheutuvat siis pääosin suuntaajan tai tasasähkökatkojan toiminnasta. Kuten kuvassa 8 esitettiin, virta-anturit ovat virtakiskoissa yleensä hyvin lähellä IGBT-kytkimiä. Virtakiskojen suuri ja säröinen virta synnyttää vastaavan magneettikentän, joka voi häiritä virta-anturin elektroniikkaa. Sähkökentässä tapahtuu jatkuvasti nopeita muutoksia, kun IGBT:t kytkevät virtakiskoon vuoroin positiivisen ja negatiivisen välipiirijännitteen. Sähkökentän aiheuttamat häiriöt voivat kytkeytyä kapasitiivisesti virta-antureihin [15]. Kapasitiivinen kytkeytyminen johtaa häiriövirtoihin, jotka voivat aiheuttaa analogisignaalin vääristymistä.

Käyttölämpötila asettaa suurimmat haasteet virta-antureille. Anturityypistä riippumatta niiden nollapoikkeama-, vahvistus- ja lineaarisuusvirheet ovat lämpötilariippuvaisia. Tämän työn sovellukset määrittävät anturien kiskoston lämpötila-alueeksi  $-40 - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja ympäristön lämpötila-alueeksi  $-40 - 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mainitut lämpötilojen ylärajat ovat vähimmäisvaatimuksia, mutta on toivottavaa, että anturi toimii myös korkeammilla lämpötiloilla. Lisähaasteen asettaa työkoneille tyypillinen syklaava käyttö. Lämpötila voi vaihdella paljon ja nopeasti koko käyttölämpöalueella, jolloin jatkuvista lämpölaajeneman muutoksista aiheutuu mekaanisia rasituksia, jotka lyhentävät antureiden käyttöikää. Myös mitattavan virran suuruuden jatkuvat suuret muutokset vaikuttavat virta-anturien häviöihin syklaavasti, joten tämäkin vaikuttaa anturin mekaanisiin rasituksiin.

Taajuusmuuttaja tai tasasähkömuuttaja lämmittää yleensä itse itseään, mutta lämpöä voi siirtyä myös ulkopuolelta. Työkonekäytöissä voidaan käyttää kaapeleita, jotka on suunniteltu kestävänsä jopa  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötiloja kaapelin ytimessä. Kuvassa 12 on esitetty eräs moduulin asennustapa, jossa moduuli on asennettu pystyyn ja moottori-kaapelit lähtevät moduulin alaosaan. Kuumat kaapelit johtavat hyvin tuottamaansa lämpöä moduulin kiskoihin. Tämä tietenkin lämmittää myös virta-antureita, kuten myös muita kiskoihin liittyviä komponentteja. Jos virranmittaukseen käytetään sunttia, aiheuttaa johtuva lämpö lämpötilaeron suntin liitinkiskojen välille, mikä johtaa luvussa 3.4 kuvailtuun ongelmaan liittyen termojännitteisiin. Lisäksi kaapeli- ja kiskoliitosten sekä suntin ja kiskojen väliset liitosresistanssit lisäävät tehohäviöitä ja lämmittävä antureita ja niiden ympäristöä varsinkin, jos liitokset ovat huonoja.



Kuva 12: Kaapelien aiheuttama kiskoston lämpeneminen

Työkoneissa tehoelektroniikka altistuu voimakkaalle tärinälle, mikä luonnollisesti vaikuttaa myös virta-antureihin. Lisäksi virta-anturit voivat altistua kosteudelle ja erilaisille kemikaaleille. Nämä vaikuttavat virta-anturiin ja sen elektroniikkaan, mutta myös virta-anturin mittaussignaalihohtimeen ja sen liittimiin. Näin ollen virta-anturin valinnassa on otettava huomioon myös kytkentä mitta- ja säätöelektroniikkaan.

### 3 Virta-anturit

Luvussa 2.3 on kerrottu mihin virranmittausta tarvitaan. Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin virta-antureita ja niiden toimintaperiaatteita. Tasa- ja vaihtosuuntaaja-moduuleissa ja tasasähkökatkoissa mitataan jokaisen vaiheen virta, kuten luvussa 2.3 on esitetty. Virta-anturin on kyettävä mittaamaan vaihevirta vaatimusten mukaisesti. Lisäksi mittaustieto on saatava ohjauspiiriin vääristymättä ja häiriintymättä.

Teollisuussovelluksissa, kuten esimerkiksi taajuusmuuttajissa ja UPS-järjestelmissä hyvin yleinen virta-anturityyppi on kompensoitu Hall-anturi muun muassa sen hyvän tarkkuuden vuoksi [16]. Lisäksi Hall-anturi kykenee mittaamaan sekä tasavirtaa että vaihtovirtaa. Virran ei tarvitse olla sinimuotoista, vaan Hall-anturi voi mitata periaatteessa mitä tahansa aaltomuotoa, kunhan aallon merkitsevät taajuudet ovat anturin mittauskaistalla. Lisätuna Hall-anturilla on toimintaperiaatteensa ansiosta galvaaninen erotus mitattavan virran ja mittauselektroniikan välillä. Kompensoitu Hall-anturi ei kuitenkaan vielä sovellu raskaiden työkoneiden virta-anturiksi, sillä sen kompensointielektroniikka ja -käämitys eivät toimi riittävän korkeissa lämpötiloissa. Pienempien virta-alueiden henkilöautosähkökäytöissä kompensoituja Hall-antureita käytetään. Kompensoimaton Hall-anturi sietää työkonesovellusten olosuhteet, mutta se ei ole yhtä tarkka kuin kompensoitu Hall-anturi. Suntti on yksinkertainen virta-anturityyppi, joka soveltuu myös työkonekäyttöihin. Lisäksi suntti mittaa Hall-anturin tavoin tasa- ja vaihtovirtaa. Silläkin on omat haittapuolensa, kuten esimerkiksi galvaanisen erotuksen puuttuminen, mutta sillä on myös paljon etuja Hall-antureihin nähden.

Aluksi luvussa 3.1 määritellään virta-anturien suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet ja suuret. Luvussa 3.2 esitellään Hall-anturien taustalla olevaa teoriaa. Luvuissa 3.3 ja 3.4 esitellään työssä tarkasteltavat virta-anturit, joita ovat Hall-anturi ja suntti. Lisäksi luvussa 3.5 esitellään lyhyesti muita yleisiä virta-anturityyppejä. Luvussa 3.6 esitellään menetelmiä mittaussignaalin siirtämiseen anturilta mittauselektroniikalle. Tämä pohjustaa lukua 3.7, jossa esitellään virta-anturien epäideaalisuuksien vaikutuksia.

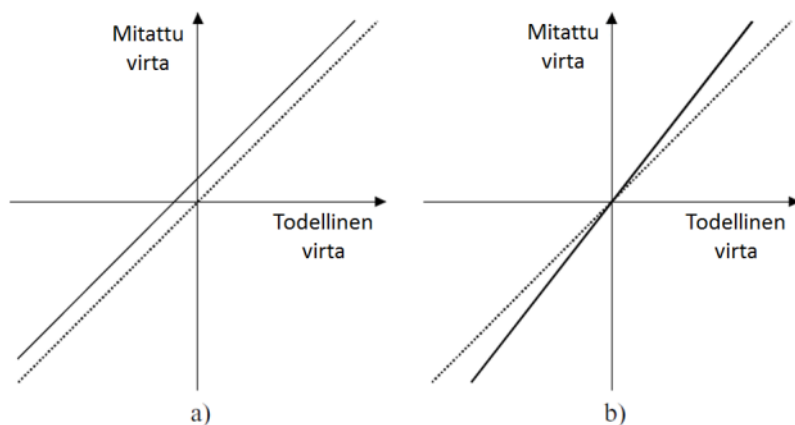
#### 3.1 Virta-anturien suorituskyvyn määrittäminen

Jotta virta-antureita voidaan vertailla, täytyy määritellä suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet. Ideaalinen virtamuunnin kykenisi mittaamaan minkä tahansa virran äärettömän nopeasti ja tarkasti vaikuttamatta virtapiiriin lainkaan. Todellisuudessa virta-antureihin liittyy paljon epäideaalisuuksia. Virta-anturin suorituskykyä kuvaavat jatkuva virranmittausalue, maksimivirranmittausalue, maksimivirta, kaistanleveys, tarkkuus ja tarkkuuden stabiilius. Anturin häviöt määrittävät jatkuvan virranmittausalueen, joka voi olla myös lämpötilariippuvainen. Maksimivirtaan ja -virranmittausalueeseen vaikuttavat useat eri tekijät. Esimerkiksi Hall-anturien ja muiden ei-ilmasydämisten magneettisten virta-anturien tapauksissa magneettisen materiaalin pysyvän kyllästymisen aiheuttava

magneettikenttä rajaa suurimman anturin lävistävän virran. Toisaalta esimerkiksi sunttivirta-anturin tapauksessa liian suuri hetkellinen virta voi ylikuumentaa anturin. Maksimivirranmittausalueen määrittävät yleensä anturielektroniikan käyttö- ja ulostulojännite sekä sunttivastuksen tai magneettisen materiaalin lineaarinen käyttöalue.

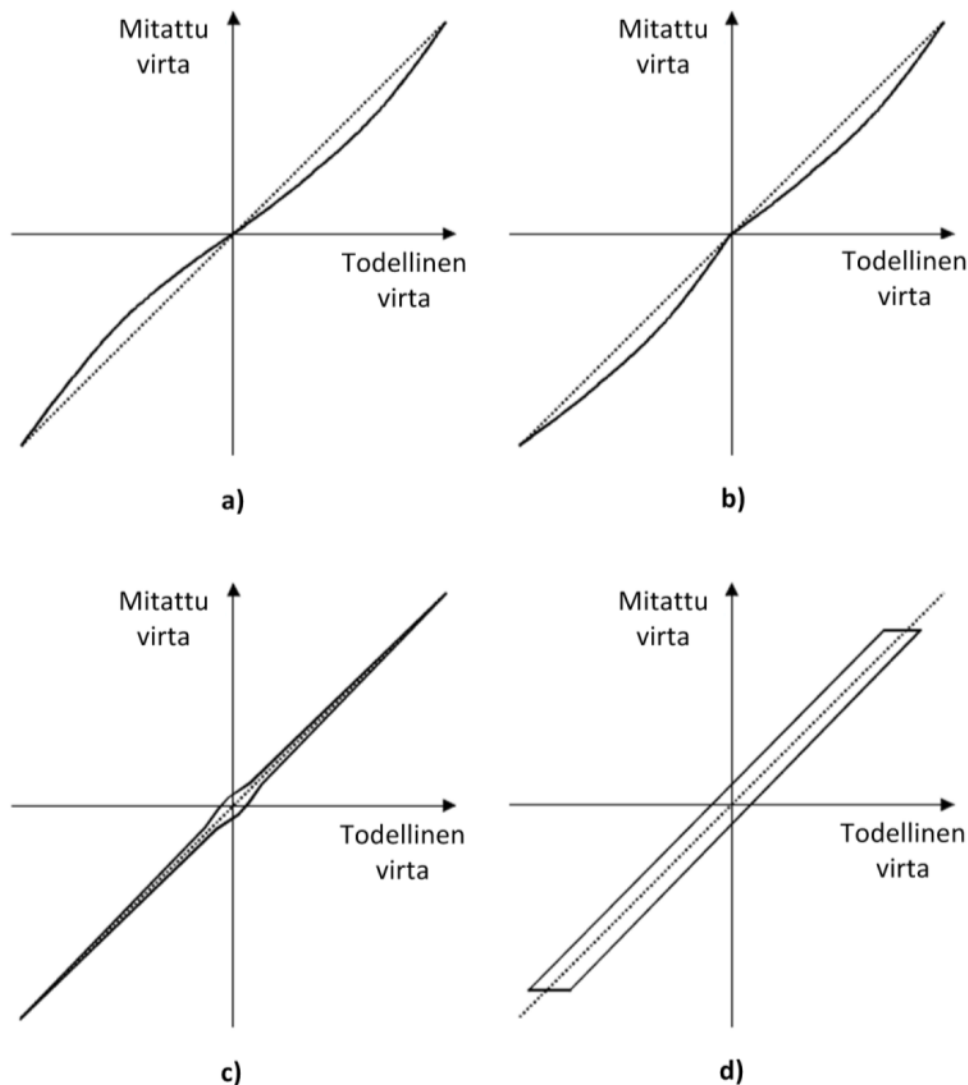
Kaistanleveys on yleisesti määritelty niin, että sillä on ala- ja ylärajataajuus niillä taajuuksilla, joissa mittaussignaali vaimenee 3 dB päästökaistan keskellä olevaan signaalitasoon nähden. Kaistanleveys on ylä- ja alarajataajuuksien välinen taajuusalue. Tässä työssä tutkitaan virta-antureita, joiden on kyettävä mittaamaan tasasähköä. Näin ollen tässä työssä kaistanleveys tarkoittaa nimenomaan mitattavan virran maksimitaajuutta, sillä anturin vasteen on oltava alipäästösuodattimen kaltainen. Kaistanleveys liittyy ennen kaikkea dynaamiseen suoritussykyyn. Virta-anturin kaistanleveyden on oltava paljon suurempi kuin mitattavan virran perusaallon, jotta säätö saa normaalissa käyttötilanteessa varmasti riittävän tarkan tiedon virrasta. Nopeissa muutostilanteissa on kyettävä havaitsemaan virran nopea muuttuminen. Jos esimerkiksi virta nousee nolasta maksimiarvoon pienemmällä aikavakiolla kuin virta-anturin aikavakiolla, mittaus-signaalin nousunopeus on hitaampi kuin virran nousunopeus.

Staatista suoritussykyä kuvaavat anturin nollapistepoikkeama, vahvistusvirhe ja epälineaarisuus. Kuvassa 13 on esitetty anturin nollapistepoikkeama ja vahvistusvirhe. Kuvissa ideaalinen mittauskäyrä on piirretty katkoviivalla. Se kulkee origon kautta ja virta-anturin näyttämä virta  $i_M$  on aina sama kuin todellinen virta  $i_P$ . Toisin sanoen  $i_M(i_P) = i_P$ . Nollapistepoikkeama (engl. offset) siirtää suoran pois origosta, jolloin mitattu virta  $i_M(i_P) = i_P + \Delta I_P$ . Näyttämän virhe  $\Delta I_P$  on yleinen mittausvirhe. Nollapistepoikkeaman tapauksessa  $G_e$  on vakio kaikilla mitattavan virran  $i_P$  arvoilla. Vahvistusvirhe ei poikkeuta suoraa pois origosta, mutta se muuttaa suoran kulmakerrointa, jolloin mittausvirhe  $\Delta I_P$  riippuu mitattavasta virrasta vahvistusvirhekertoimen  $G_e$  mukaisesti. Toisin sanoen  $i_M(i_P) = i_P + G_e i_P$ . [17] Nollapistepoikkeama on yleensä helppo kompensoida, kun vaihtosuuntaaja tai tasasähkökatkoja on poissa käytöstä. Virta on tällöin varmasti nolla, joten virta-anturin nolasta poikkeava arvo on tällöin laskettavissa ja kompensoitavissa. Varsinkin Hall-antureilla ongelmana on se, että nollapistepoikkeama vaihtelee ja voi virran suunnasta riippuen olla origon molemmilla puolilla. Lisäksi yleensä sekä vahvistusvirhe että nollapistepoikkeama muuttuvat lämpötilan muutosten vaikutuksesta.



Kuva 13: Anturin a) nollapistepoikkeama, b) vahvistusvirhe (muokattu lähteestä [18])

Epälineaarisuus on haasteellisempi kuin edellä esitetyt virhetyypit. Kuvassa 14 on esitetty eräitä lineaarisuusvirhekyäriä. Epälineaarisuus muuttaa suoran muotoa. Periaatteessa voidaan sanoa, että epälineaarisuus on eräänlainen vahvistusvirhe, jossa vahvistusvirhekerroin  $G_e$  ei ole vakio. Lineaarisuusvirhe esitetään datalehdissä yleensä prosenttilukuna, joka kuvaa maksimipoikkeamaa ideaalisesta suorasta. Luku ei kuitenkaan yleensä sisällä tietoa epälineaarisuuskäyrän muodosta [16]. Kuvan 14 lineaarisuusvirhekyvät ovat yksinkertaisia esimerkkejä, mutta käyrän muoto voi todellisuudessa olla hyvin epämääräinen. Myös epälineaarisuus on lämpötilariippuvainen virhetyyppi. Lämpötilan muutos voi myös vaikuttaa käyrämuotoon. Hall-anturin magneettinen hystereesi vaikuttaa nollapistepoikkeaman lisäksi lineaarisuuteen [18]. Tässä esitettyä epälineaarisuutta ei ole syytä sekoittaa virranmittausalueen ääripäiden epälineaarisuuteen, joka aiheutuu esimerkiksi magneettisen materiaalin kyllästymisestä.

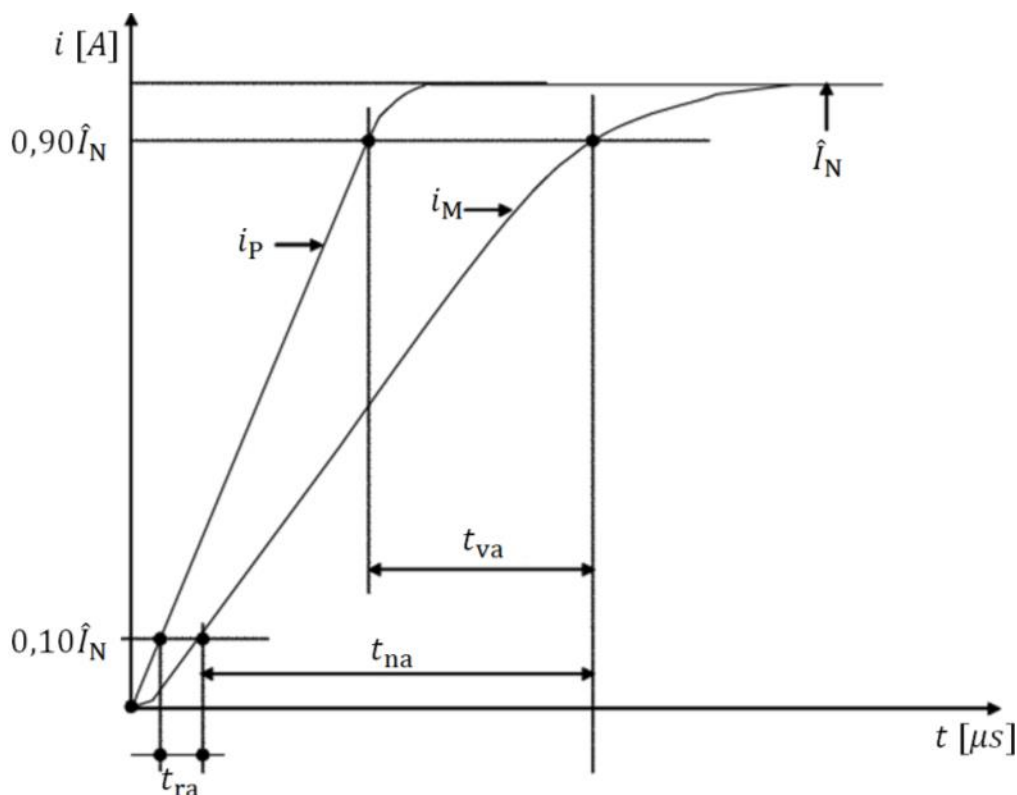


Kuva 14: Anturin epälineaarisuuskäyriä (muokattu lähteestä [16])

Kuvat 14a) ja 14b) ovat tyypiltään integraalisia lineaarisuusvirheitä. Integraalinen lineaarisuusvirhe on virhetyyppi, joka kasvaa mentäessä nolasta mitta-alueen puoleen väliin. Tämän jälkeen virhe palautuu mentäessä kohti mitta-alueen maksimia. Kuvassa 14c) on hystereesivirhetyyppi, jossa virhe esiintyy vain pienillä virroilla. Kuvassa 14d) on esimerkiksi Hall-anturille tyypillinen magneettinen hystereesi, joka vaikuttaa koko virta-alueeseen. Differentiaalinen lineaarisuusvirhe näkyy epämääräisinä ja suhteellisen suurina muutoksina mittaussignaaliin, kun mitattavassa suureessa tapahtuu pieni muutos. Differentiaalinen virhe johtuu yleensä AD-muunnoksen epäideaalisuuksista, kuten esimerkiksi kvantisointivirheestä. Tyypillisesti differentiaalinen virhe näkyy nollapistepoikkeamana tai kohinaa AD-muunnoksen jälkeen. [16] Luvussa 3.6 esitetään  $\Delta\Sigma$ -modulaatioon perustuva AD-muunnos, joka vähentää kvantisointikohinaa merkittävästi tavalliseen AD-muunnokseen verrattuna.

Dynaamista suorituskykyä kuvaavat kuvassa 15 esitetyt vasteaika  $t_{va}$ , nousuaika  $t_{na}$  ja reagointiaika  $t_{ra}$ . Kuvassa 15 annetaan virta-anturille virtapulssi  $i_p$ , joka nousee jollakin nousuajalla anturin nimellisvirtaan  $\hat{I}_N$ . Virta-anturin antamaa mittaustietoa  $i_M$  verrataan

virtaan  $i_p$ . Reagointiaika  $t_{ra}$  on aika, joka kuluu mittaussignaalin  $i_M$  nousuun arvoon  $0,10\hat{I}_N$  siitä hetkestä kun todellinen virta  $i_p$  saavutti arvon  $0,10\hat{I}_N$ . Nousuaika  $t_{na}$  on aika, joka kuluu mittaussignaalin  $i_M$  nousuun arvosta  $0,10\hat{I}_N$  arvoon  $0,90\hat{I}_N$ . Vasteaika  $t_{va}$  on aika, joka kuluu mittaussignaalin  $i_M$  nousuun arvoon  $0,90\hat{I}_N$  siitä hetkestä kun todellinen virta  $i_p$  saavutti arvon  $0,90\hat{I}_N$ . Suorituskykyä arvioitaessa on tärkeää huomioida todellisen virran nousuaika  $t_{na,p}$  (usein nousunopeus  $di/dt$ ), sillä se vaikuttaa oleellisesti virta-anturin mittaussignaalin nousuaikaan.



Kuva 15: Dynaamista suorituskykyä kuvaavat suureet (muokattu lähteestä [17])

Suorituskyvyn stabiiliudella tarkoitetaan todettujen virheiden pysyvyyttä lämpötilan muuttuessa ja komponenttien ikääntyessä. Usein datalehdissä ilmoitetut arvot on mitattu esimerkiksi 25 °C lämpötilassa. Varsinkin tämän työn sovelluksissa on oleellista tietää kuinka eri virheet muuttuvat anturien käyttölämpötiloissa. Näin ollen tässä työssä tullaan mittaamaan staattista suorituskykyä sovelluksen äärilämpötiloissa.

### 3.2 Hall-anturien teoria

Hall-anturi on virtajohtimen magneettivuon tiheyttä mittaava anturi. Fysikaalinen toiminta perustuu kahteen tässä luvussa esitettävään periaatteeseen. Magneettisydämellä keskitetään magneettivuo Hall-elementille, joka hyödyntää Hall-ilmiötä mitatakseen ilmvälin magneettivuon tiheyden.

### 3.2.1 Magnetismi

Ampèren lain mukaan virtajohdin synnyttää ympärilleen magneettikentän  $H$ . Magneettikentän suunta on oikean käden säännön mukaan virtajohtimen ympäri vastapäivään, kun virta kulkee kohti tarkastelusuuntaa. Magneettivuon tiheys on verrannollinen magneettikentän voimakkuuteen:

$$B = \mu H, \quad (8)$$

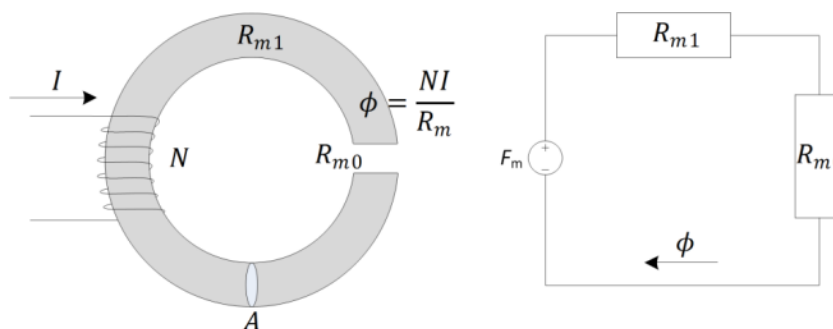
jossa  $B$  magneettivuon tiheys,  $\mu$  on permeabiliteetti ja  $H$  on magneettikentän voimakkuus.

Permeabiliteetti määrää materiaalin kyvyn johtaa magneettivuota. Permeabiliteetti määritellään

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (9)$$

jossa  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am) ja  $\mu_r$  on materiaalille ominainen suhteellinen permeabiliteetti. Ferromagneettisilla materiaaleilla suhteellinen permeabiliteetti on hyvin suuri, jopa useita tuhansia (vrt. ilman  $\mu_r = 1,0$ ). [12]

Kuvassa 16 on esitetty yksinkertainen magneettipiiri ja sen sijaiskytkentä.



Kuva 16: Magneettipiiri ja sen sijaiskytkentä

Sydän on magneettisesti johtavaa materiaalia ja se on ympyrän muotoinen rengas, jossa on pieni ilmaväli. Tämä sydänrakenne vastaa Hall-anturin sydämen rakennetta, joka esitellään luvussa 3.3. Sydämen ympärille on kierretty käämi, jossa on  $N$  kierrosta. Kun käämissä kulkee virta  $I$ , sydäntä magnetoi magnetomotorinen voima  $F_m$ , joka muodostaa sydämeen magneettivuon

$$\phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m0}}, \quad (10)$$



jossa  $F_m$  on magnetomotorinen voima,  $R_m$  on piirin kokonaisreluktanssi,  $N$  on johdinkierrosten lukumäärä,  $I$  on silmukan virta,  $R_{m1}$  on ferriitin reluktanssi ja  $R_{m0}$  on ilmapälin reluktanssi. Sydämen magneettivuon tiheys

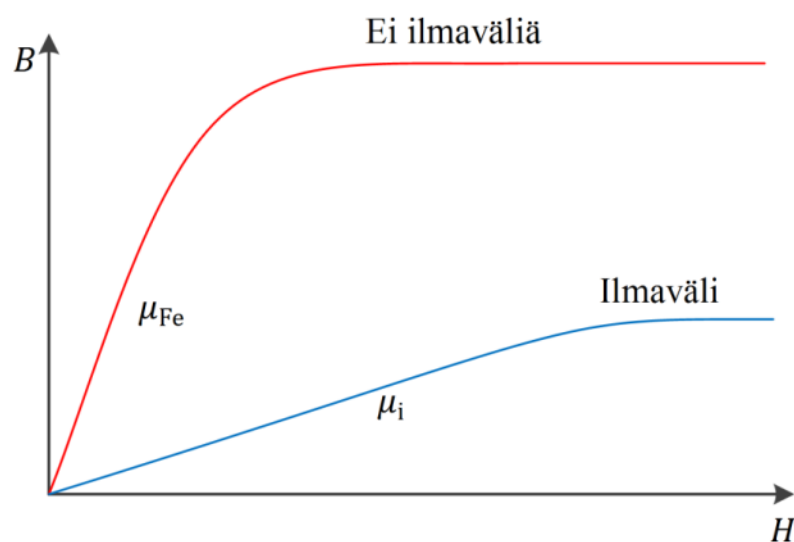
$$B = \frac{\phi}{A}, \quad (11)$$

jossa  $A$  on sydämen poikkipinta-ala. Säännölliselle kappaleelle voidaan laskea reluktanssi

$$R_m = \frac{l}{\mu A}, \quad (12)$$

jossa  $l$  on sydämen kehän pituus. [19] [20]

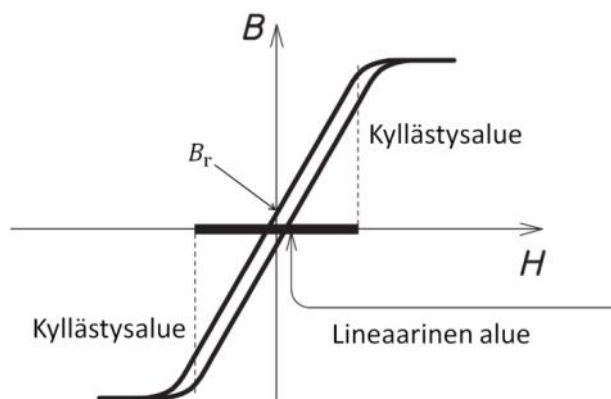
Kuvassa 17 on esitetty ilmapälin vaikutus magneettipiirin magnetoitumiskäyrään. Käyrä esittää magneettivuon tiheyden magneettikentän voimakkuuden funktiona yhtälön (8) mukaisesti. Magneettivuon tiheys kasvaa magneettikentän voimistuessa, kunnes magneettinen materiaali kyllästyy. Ilmapälin permeabiliteetti on pieni, joten sen reluktanssi on suuri. Näin ollen ilmapälin sydämen  $BH$ -käyrä on loivempi. Kyllästyismagneettivuontiheys on materiaalille ominainen vakio, joka määrittää suurimman magneettivuontiheyden, joka materiaalissa voi olla. Kyllästyksen aiheuttaa se, että ferromagneettisilla aineilla permeabiliteetti ei ole vakio [20].



Kuva 17: Ilmapälin vaikutus  $BH$ -käyrään

Magneettisen kyllästyksen lisäksi ferromagneettisille aineille ominainen ilmiö on hystereesi. Kuvassa 18 on esitetty hystereesisilmukka. Kun esimerkiksi magnetoitonta rautaa magnetoidaan positiivisella magneettikentällä, magnetoituu se kohti ensimmäisen neljänneksen kyllästyispistettä. Kun magneettikentää pienentyy, magneettivuontiheys seuraa ylempää käyrää. Magneettikentän palaututtua nolaksi,

sydämeen jää pieni jäännösmagnetointi, jota kutsutaan remanenssivuoksi  $\phi_r$ . Kuvaan 18 on merkitty remanenssivuontiheys  $B_r$ . Hystereesi on haitallinen ilmiö, sillä se aiheuttaa häviöitä, ja toisaalta se aiheuttaa myös jäännösmagnetoinnin [12].



Kuva 18: Hystereesisilmukka (muokattu lähteestä [17])

Sähkömagneettinen induktio on ilmiö, jossa virtasilmukan päiden välille indusoituu jännite, kun silmukan välinen magneettivuo muuttuu. Faradayn induktiolain mukaan virtapiirissä, jossa on  $N$  silmukkaa, päiden välille muodostuva jännite on riippuvainen vuon muutosnopeudesta. Indusoituvaa jännitettä on

$$u_i = N \frac{d\phi}{dt}, \quad (13)$$

jossa  $N$  on kierrosten lukumäärä ja  $\frac{d\phi}{dt}$  on vuon muutosnopeus. [20]

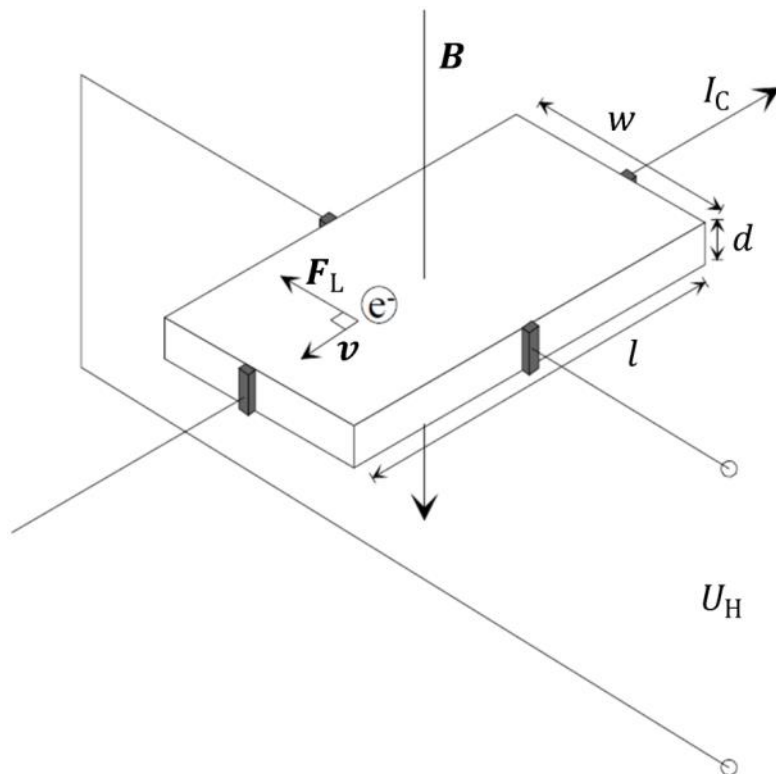
### 3.2.2 Hall-ilmiö

Kuvassa 19 on esitetty Hall-elementin peruseriaate. Hall-elementti on ohut johdepala, jonka ominaisresistanssi  $R_H$  on suuri. Hall-elementit valmistetaan yleensä erilaisista metalliyhdisteistä, kuten esimerkiksi indium-antimonista (InSb), indium-arseenista (InAs) tai gallium-arseenista (GaAs) [17] [21]. Elementin yli kytketään käyttöjännite  $U_s$ , jolloin sen läpi kulkee ominaisresistanssista ja käyttöjännitteestä riippuva ohjausvirta  $I_C$ . Ohjausvirta on käytännössä johteen läpi kulkeva elektronivirtaus. Elektronit kulkevat nopeudella  $\mathbf{v}$  tasaisesti jakautuen virran suuntaiselle poikkipinnalle. Jos johdepalan läpi kulkee magneettikenttä, vaikuttaa magneettivuon tiheys  $\mathbf{B}$  elektroneihin Lorentzin voiman  $\mathbf{F}_L$  mukaisesti:

$$\mathbf{F}_L = e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (14)$$

jossa  $e$  on elektronin varaus,  $\mathbf{v}$  on elektronin nopeus ja  $\mathbf{B}$  on magneettivuon tiheys. [17] [22] Oikean käden säännön mukaan elektroneihin vaikuttavan voiman  $\mathbf{F}_L$  suunta on sellainen, että johteessa kulkevat elektronit kaartavat kuvan 19 virran  $I_C$  ja magneettivuon tiheyden  $\mathbf{B}$  muodostaman tason keskipisteen vasemmalta puolelta. Vasemmalla

reunalla on siis elektroneja tiheimmin kuin oikealla reunalla, joten johteen yli syntyy varausepätasapainon johdosta jännite  $U_H$ . Tätä kutsutaan Hall-jännitteeksi  $U_H$  [17]. Hall-jännite on hyvin pieni. Esimerkiksi piillä se on yhden gaussin magneettivuon tiheydellä käyttöjännitteen funktiona  $7 \mu V/U_s$  [23]. Näin esimerkiksi viiden voltin käyttöjännitteellä ja yhden gaussin ( $10^{-4}$  T) magneettivuontiheydellä Hall-jännitteeksi tulee  $35 \mu V$ .



Kuva 19: Hall-elementti ja Hall-ilmiö [16]

Hall-jännite voidaan esittää muodossa

$$U_H = I_C \frac{K}{d} B + U_{OH}, \quad (15)$$

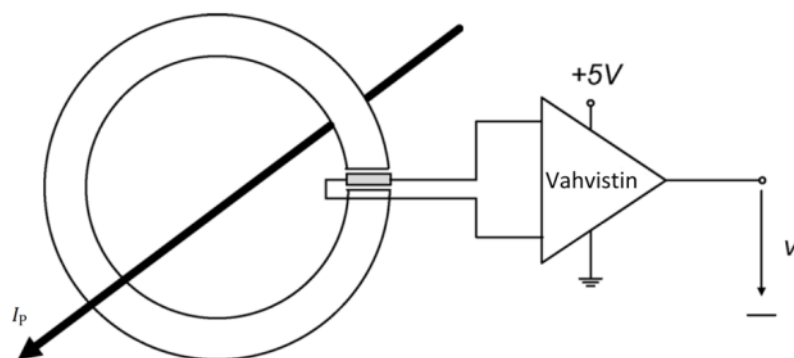
jossa  $K$  on johteelle ominainen Hall-vakio,  $d$  on johteen paksuus ja  $U_{OH}$  on nollapistevirhejännite ulkoisen kentän puuttuessa. Termi  $I_C \frac{K}{d}$  kuvaa Hall-elementin herkkyyttä. [17]

Hall-elementteihin liittyy kaksi keskeistä epäideaalisuutta: resistanssi ja nopeille magneettivuon muutoksille häiriöaltis jännitteenmittauspiiri. Resistanssi on oleellinen ominaisuus ohjausvirran suuruuden kannalta, sillä tyypillisesti Hall-anturin ohjausvirta muodostetaan kytkemällä käyttöjännite suoraan elementin yli. Epäideaalisuuden resistanssista tekee se, että se aiheuttaa häviöitä vakio-ohjausvirran takia. Materiaali-valinta ja Hall-elementin paksuus  $d$  vaikuttavat herkkyyteen ja resistanssiin. Näin ollen elementin valmistuksessa on tehtävä kompromissi häviöiden ja herkkyyden välillä. [21]

Toinen epäideaalisuus on Hall-elementin jännitteenmittausjohtimien muodostama silmukka, johon indusoituu jännitteitä nopeasti muuttuvien vuontiheyksien johdosta. Tämä asettaa ylärajan Hall-elementin kaistanleveydelle. [21] Jännitteenmittauspiiri muodostaa aina pienen silmukan, jossa on suuri impedanssi. Näin ollen nopeat virtapulssien synnyttämät magneettivuon muutokset aiheuttavat häiriöitä Hall-jännitteen mittauspiiriin. Lisäksi silmukkaan indusoituu muita ulkoisia häiriöitä.

### 3.3 Hall-anturi

Hall-anturi mittaa virran  $I_p$  hyödyntämällä Hall-elementtiä, joka mittaa virtajohtimen ympärillä olevan magneettivuon tiheyden  $B$  kuvan 20 mukaisesti. Hall-elementti on asetettu magneettisesta materiaalista (esimerkiksi ferriitti tai piiteräs [23]) valmistetun renkaan muotoisen sydämen ilmaväliin. Rengas keskittää paikallisesti virtajohtimen synnyttämän magneettikentän ilmaväliinsä toimien luvussa 3.2.1 esitetyn magneettipiirin tavoin. Ero kuvan 16 magneettipiiriin on se, että käämin sijasta magneettikentän muodostaa yksi renkaan lävistävä virtajohdin tai -kisko. Hall-elementti muodostaa luvussa 3.2.2 esitetyllä tavalla Hall-jännitteen  $U_H$ , josta kompensoimalla poistetaan nollapistevirhe  $U_{OH}$ . Lisäksi Hall-jännite vahvistetaan halutun tasoiseksi ulostulojännitteeksi. [17] Hall-anturin magneettipiirissä voi olla myös useampia ilmavälejä ja Hall-elementtejä vastaavasti, jolloin vuontiheys ferriitissä on pienempi. Näin yksittäisten Hall-elementtien vuontiheyden mittausaluet voivat olla pienemmät kuin yhden Hall-elementin järjestelmissä. Tämä kuitenkin vaikuttaa tarkkuuteen, sillä Hall-elementti on Hall-anturin suurin virhelähde.



Kuva 20: Hall-anturin periaate (muokattu lähteestä [21])

Hall-antureita on kahta päätyyppiä, jotka ovat kompensoitu (engl. closed-loop) ja kompensoimaton (engl. open-loop). Hall-elementin toiminta ja Hall-jännitteen vahvistaminen ovat vastaavia molemmissa anturityypeissä. Mittausperiaate eroaa magneettipiirin käytön osalta. Molemmat mittaavat virtaa epäsuorasti: kompensoimaton anturi mittaa ilmavälin magneettivuon tiheyttä, kun taas kompensoitu anturi mittaa vuon nollaksi pakottavan kompensointivirran suuruutta. Ulkoisesti nämä ovat suunnilleen samanlaisia, mutta kompensointielektroniikka ja -käämi voivat tehdä kompensoidusta

anturista hieman suuremman. Kuvassa 21 on eräs LEMin valmistama virtakiskoon asennettava kompensoimaton Hall-anturi.

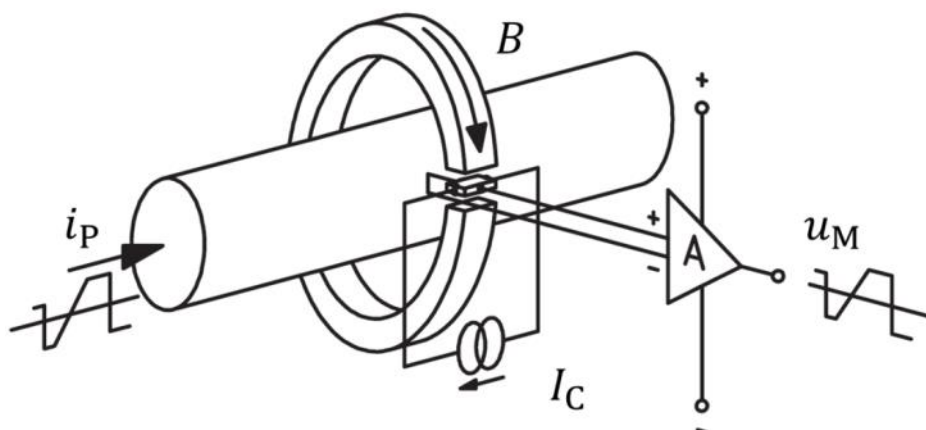


Kuva 21: LEM HAH1DR 900-S (muokattu lähteestä [24])

Hall-anturin merkittävin etu on se, että se on luonnostaan galvaanisesti erottava virta-anturi. Tämä on merkittävä etu siitä syystä, että erotuksen tekeminen esimerkiksi elektronisilla erotusmuuntajilla on kallista. Lisäetu erotuksesta on mekaanisen asennuksen helppous; anturia ei tarvitse kytkeä sarjaan tai muullakaan tavalla liittää galvaanisesti virtakiskoon tai -johtimeen. Koska Hall-anturi ei ole osa päävirtapiiriä, sen häviöt ovat vähäiset rajoittuen ainoastaan magneettisiin häviöihin ja elektroniikan käyttöhäviöihin. Kuitenkin pienen vähän tilaa vievän Hall-anturin eräs rajoitus on kuvassa 21 nähtävän virtakiskolle tarkoitetun aukon koko, joka voi joissakin tapauksissa rajoittaa virtakiskon poikkipinta-alan pienemmäksi, kuin olisi tarpeen. Tämä voi johtaa kiskon liialliseen kuumenemiseen ja mahdollisesti kiskon jäähtymisen tarpeeseen. Esimerkiksi sivulla 17 olevan kuvan 12 tapauksessa toimintaympäristö voi olla niin vaativa, että liian suuri virrantiheys Hall-anturin kohdalla muodostuu ongelmaksi. Kuitenkin on syytä muistaa, että sunttivastuksen aiheuttamat häviöt ovat todennäköisesti suuremmat kuin kuvan 21 anturin lävistävän kiskon häviöt.

### 3.3.1 Kompensoimaton Hall-anturi

Kuvassa 22 on esitetty kompensoimattoman Hall-anturin toimintaperiaate. Magneettivuon tiheys  $B$  on verrannollinen virtajohtimessa tai -kiskossa kulkevaan virtaan  $i_p$ . Anturin mittauselektronikalle tuotu käyttöjännite  $U_s$  muodostaa Hall-elementille ohjausvirran  $I_c = U_s/R_H$ , jossa  $R_H$  on Hall-elementin resistanssi. Hall-jännite vahvistetaan differentiaalivahvistimella  $A$  ulostulojännitteeksi  $u_M$ , joka on verrannollinen virtaan  $i_p$  ja käyttöjännitteeseen  $U_s$ . Kompensoimaton anturi voi mitata virtaa, kun sydänmateriaalin magnetointi pysyy kuvassa 18 esitetyn hystereesisilmukan lineaarisella alueella. [17] Toisin sanoen magneettisen sydänmateriaalin magnetointiominaisuudet ensisijaisesti määrittävät virranmittausalueen.

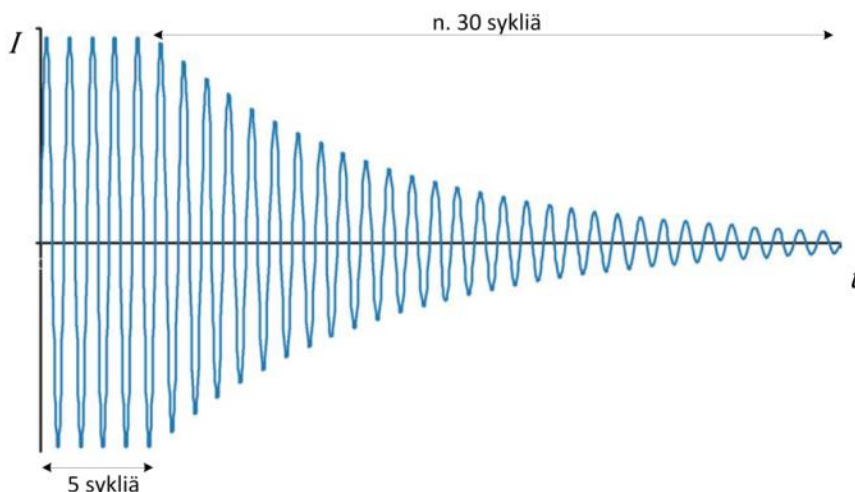


Kuva 22: Kompensoimaton Hall-anturi (muokattu lähteestä [17])

Kompensoimattoman Hall-anturin tarkkuuteen vaikuttavat useat eri tekijät. Hall-elementti aiheuttaa nollapistevirheen nollavirralla, vahvistusvirheen, epälineaarisuutta ja kohinaa. Magneettisydämen remanenssivuo synnyttää myös nollapistevirhettä. Hall-anturin elektroniikka vaikuttaa myös nollapistevirheeseen, lineaarisuuteen ja kohinaan. Lisäksi lämpötila vaikuttaa nollapistevirheeseen ja vahvistukseen. Yleensä anturit kalibroidaan huoneenlämmön tuntumassa, esimerkiksi 25 °C lämpötilassa. Valmistajien datalehdistä selviää käyttäytyminen lämpötilan funktiona. Yleisesti voidaan sanoa, että kompensoimattomalla Hall-anturilla virhe on muutaman prosentin luokkaa. [17]

Kaistanleveys on tärkeä parametri monissa sovelluksissa. Tämän työn käsittelemissä sovelluksissa täytyy voida mitata tasasähköä, vaihevirtaa pienistä taajuuksista jopa 1000 Hz:n taajuuteen ja nopeita muutoksia, joiden aikavakiot ovat noin 20  $\mu$ s. Hall-anturi on tähän tarkoitukseen hyvä, sillä sen kaistanleveys on yleensä riittävä. Tasasähkön mittaamiseen Hall-anturi on erinomainen. Ylärajan kaistanleveydelle asettavat mittaus-elektroniikka ja magneettiin sydänmateriaalin kuumeneminen, jonka aiheuttavat sydämen magneettiset häviöt, joita ovat pyörrevirrat ja hystereesihäviöt [17].

Hall-anturin ferriitissä voi olla remanenssin aiheuttaman nollapistevirheen lisäksi pysyvä nollapistevirhe, joka aiheutuu yleensä ylivirtatilanteista. Jos mitattava virta ylittää maksimivirran esimerkiksi oikosulkuilanteissa tai muissa vikatilanteissa, virran magneettikenttä magnetoi ferriittiä hyvin voimakkaasti. Virhe on tyypillisesti yli yhden prosentin luokkaa. Ainoa tapa poistaa pysyvä magnetoituminen on käyttää demagnetointiin niin sanottua degauss-sykliä, josta on esitetty esimerkki kuvassa 23. Kuva esittää päävirran suuruutta ajan funktiona. Kuvan 23 esimerkissä käytetään viiden syklin verran maksimivirtaa, jonka jälkeen virta pienennetään nollaan noin kolmenkymmenen syklin kuluessa. [21]



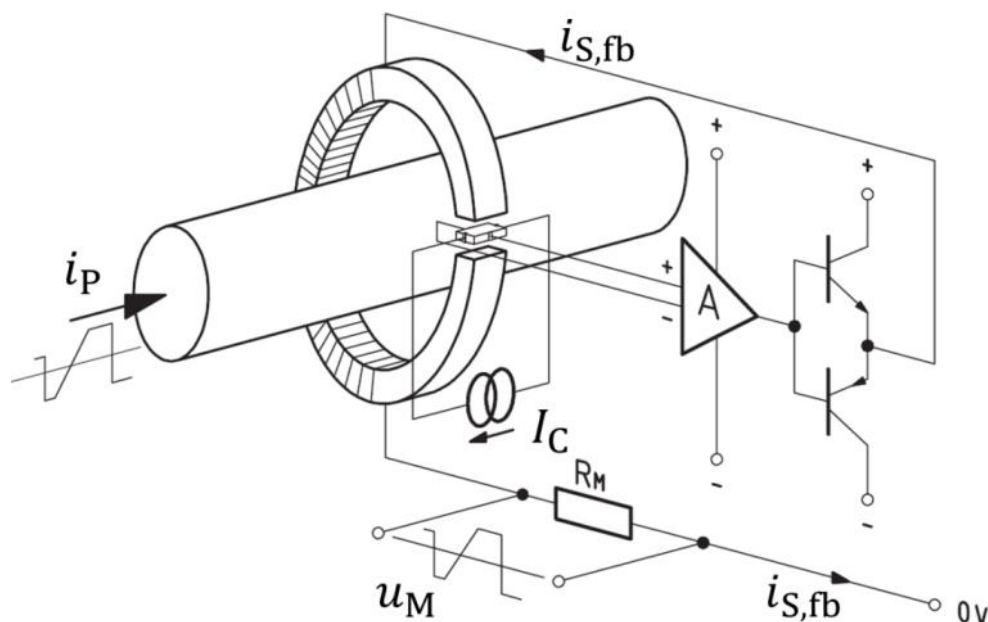
Kuva 23: Degauss-sykli (muokattu lähteestä [21])

On selvää, että demagnetointi on joissakin sovelluksissa ongelmallista toteuttaa. Tasa- ja vaihtosuuntaajilla demagnetointi voidaan toteuttaa vaihe kerrallaan, jolloin virta kulkee moottorin tai generaattorin kautta jakautuen karkeasti ottaen puoliksi kahdelle muulle vaiheelle. Puolisiltatasasähkömuuttajalla demagnetointi on haasteellisempi toteuttaa. Virta voi tuki kulkea yhdestä vaiheesta kahteen muuhun vaiheeseen alajännitepuolen kuristimien kautta, mutta tällöin on huomioitava kuormaksi kytketty akku tai muu energiavarasto. Käytännössä kuorma on kyettävä irrottamaan tasasähkömuuttajan Hall-anturien demagnetoinnin ajaksi.

Merkittäviä etuja kompensoituun Hall-anturiin verrattuna ovat kompensointielektronikan ja -käämin puuttuminen, tästä johtuva pienempi koko ja halvempi hinta ja pienempi virrankulutus käyttäjännitteestä. Haittapuolia ovat huonompi tarkkuus, pienempi kaistanleveys ja demagnetoinnin hankaluus. Tyypillisiä käyttökohteita ovat taajuusmuuttajat, tehokertoimen korjauspiirit, hitsauslaitteet, akkuhallintapiirit ja ajoneuvosähkökäytöt [17].

### 3.3.2 Kompensoitu Hall-anturi

Kompensoitu Hall-anturi on hieman kompensoimatonta monimutkaisempi. Kuten kuvasta 24 nähdään, perusrakenne on sama. Nyt vahvistettua Hall-jännitettä ei käytetä anturin ulostulona, vaan se ohjaa kompensointivirtaa  $i_{s,fb}$ . Magneettisydämen ympärille on käämitty johdinlankaa, jonka avulla kompensointivirta  $i_{s,fb}$  muodostaa magneettisydämeen virran  $i_p$  synnyttämään magneettikenttään nähden vastakkaissuuntaisen magneettikentän. Kompensointivirta pakottaa Hall-elementin lävistävän magneettivuon nolaksi. Vastus  $R_M$  toimii sunttina, jonka avulla kompensointivirta mitataan ja muutetaan jännitetiedoksi  $u_M$ . [17]



Kuva 24: Kompensoitu Hall-anturi (muokattu lähteestä [17])

Kompensoidun Hall-anturin toimintaperiaatteessa on muutama etu kompensoimattomaan nähden. Nollavuon käyttö poistaa lämpötilan muutoksesta johtuvan vahvistuksen ajautuman. Lisäksi käämitys toimii suurilla taajuuksilla virtamuuntajana kasvattaen anturin kaistanleveyttä merkittävästi. [17] Eräs tarkkuutta parantava ominaisuus on se, että Hall-elementin täytyy mitata tarkasti vain nollan lähellä olevaa magneettivuon tiheyttä. Yleisesti ottaen tarkkuuteen vaikuttavat lämpötilariippuvuus, nollapistevirhe, Hall-elementin, elektronikan ja magneettipiirin epälineaarisuus, vahvistustoleranssi ja suuntivastuksen toleranssi ja tarkkuus [17]. Lineaarisuusvirhe voi kompensoiduilla Hall-antureilla olla niinkin hyvä kuin 0,1 % [23].

Kompensoidun Hall-anturin kaistanleveys on suurempi kuin kompensoimattoman Hall-anturin, sillä kompensointikäämi toimii virtamuuntajana suurilla taajuuksilla. Kaistanleveys on yleensä 200 - 300 kHz, mutta koko kaistalla ei voida mitata nimellistä virtaa magneettisten häviöiden johdosta. Käytännössä kaistanleveys rajoittuu 100 kHz:n paikkeille. Reagointiajat ovat nopeita, tyypillisesti jopa 1  $\mu$ s luokkaa.  $di/dt$  -arvoissa kompensoiduilla antureilla päästään 50 - 400 A/ $\mu$ s arvoihin. [17] [21] [23]

Koska kompensoidussa anturissa ferriitin vuontiheydet ovat hyvin pieniä, ei magneettisia häviöitä ja remanenssia ole teoreettisesti ollenkaan. Toki käytännössä näitä ilmiöitä esiintyy, mutta niiden vaikutus on pienempi kuin kompensoimattomalla Hall-anturilla. [21]

Myös kompensoitu Hall-anturi voi magnetoitua ylivirran vaikutuksesta pysyvästi, jos kompensointikäämiin ei saada riittävästi virtaa, jotta magneettivuo voitaisiin kompensoida magneettipiirin lineaariselle alueelle. Myös kompensoidulla Hall-anturilla voidaan käyttää samanlaista demagnetointia kuin kompensoimattomalla Hall-anturilla. Lisäksi



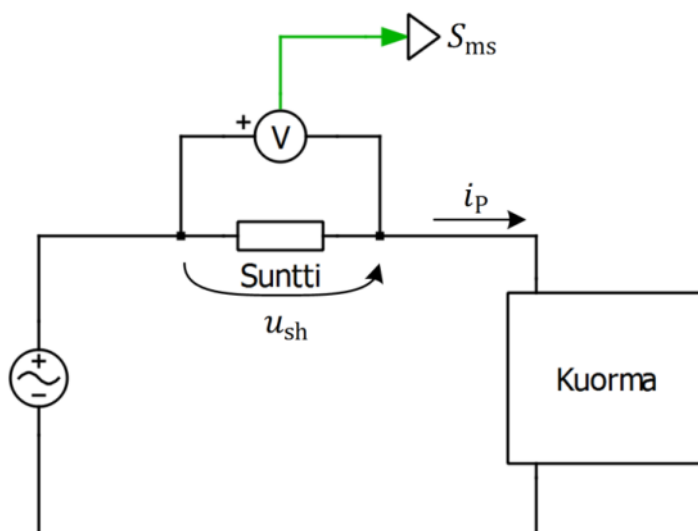
on mahdollista toteuttaa demagnetointi kompensointikäymityksen avulla, mutta tämä vaatii monimutkaisemman kompensointielektroniikan.

Kompensoidun Hall-anturin etuja kompensoimattomaan verrattuna ovat parempi tarkkuus ja lineaarisuus, suurempi kaistanleveys ja pelkästään kompensointielektroniikalla toteutettava demagnetointi. Haittapuolina ovat monimutkaisempi rakenne, kalliimpi hinta, suurempi komponentti, suurempi käyttöjännite ja suurempi virrankulutus käyttöjännitteestä [21] [23]. Kompensointielektroniikka asettaa haasteita anturin toiminnalle työkonenäkökäyttöympäristössä. Suurin ongelma on kompensointikäymitys. Se on yleensä valmistettu kuparista, jonka resistanssi kasvaa voimakkaasti sen kuumetessa. Kun resistanssi kasvaa paljon, loppuu kompensointivirran syöttävästä piiristä jännite kesken. Toisin sanoen, virranmittausalue alkaa kutistua, kun suuria magneettivoita ei enää pystytä kompensoimaan ferriitistä. Käytännössä suurivirtaiset kompensoidut Hall-anturit on yleensä suunniteltu korkeintaan 80 - 90 °C lämpötiloihin.

Kompensoituja Hall-antureita käytetään sellaisissa teollisuussovelluksissa, jotka vaativat tarkkaa virranmittausta. Lisäksi kompensoituja Hall-antureita voi käyttää myös muissa sovelluksissa, kuten esimerkiksi ajoneuvosähkökäyttösovelluksissa. Tällöin on kuitenkin otettava huomioon muun muassa käyttölämpötilarajoitukset.

### 3.4 Suntti

Suntti on toimintaperiaatteeltaan hyvin yksinkertainen. Se on pieni tarkkuusvastus, joka kytketään kuorman kanssa sarjaan, kuten kuvassa 25 on esitetty. Kuormavirta  $i_p$  muodostaa Ohmin lain mukaisesti jännitehäviön  $u_{sh} = R_{sh}i_p$ . Jännitehäviö mitataan ja muutetaan haluttuun muotoon. Suntin resistanssi on suurivirtaisissa sovelluksissa tyypillisesti luokkaa 10 - 100  $\mu\Omega$ . Sunttivirta-anturi koostuu sunttivastuksesta ja mittaus-elektroniikasta. Jatkossa tässä työssä suntilla tarkoitetaan kokonaista anturia.

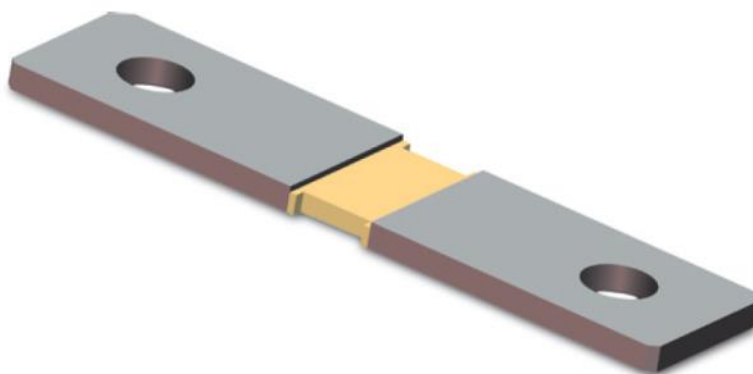


Kuva 25: Suntin toimintaperiaate

Kuvasta 26 nähdään, että suntin rakenne on hyvin yksinkertainen. Keskellä on resistiivisistä materiaalista valmistettu tarkkuusvastus, joka on liitetty kuparikiskoihin. Resisttiivisen materiaalin lämpötilakerroin pyritään pitämään pienenä, joten oikea materiaalivalinta on hyvin tärkeää. Materiaalina voidaan käyttää erilaisia metalliseoksia, kuten esimerkiksi magnesium-kuparia tai nikkeli-kromia [21]. Mittauselektroniikka liitetään kiskoihin mahdollisimman lähelle vastusta. Mittauselektroniikka voi olla suntin valmistajan tekemä ja kiskoon liittämä, tai elektroniikka voi olla myös jonkin ulkopuolisen valmistajan. Lisäksi on mahdollista, että tehoelektroniikkavalmistaja ostaa ainoastaan sunttivastuksen ja liittää siihen oman elektroniikan. Näistä viimeisin vaihtoehto on siinä mielessä järkevin, että valmistajan on helppoa tarvittaessa vaihtaa sunttivastuksen toimittajaa, kun elektroniikka on itse suunniteltu.

Suntin merkittävin etu on sen yksinkertaisuus. Eräs haittapuoli on kuitenkin galvaanisen erotuksen puuttuminen, sillä suntin jännitehäviö on mitattava galvaanisesti. Näin ollen erotus on toteutettava mittauselektroniikalla, mikä tuo muuten edulliseen komponenttiin lisähintaa. Sekä mittaussignaali että suntin virtakiskon puoleinen käyttöjännite on kyettävä siirtämään riittävän hyvän galvaanisesti erotetun rajapinnan yli. Yksi väistämätön ongelma on se, että suntti on kytkettävä sarjaan virtakiskon tai -johtimen kanssa tehden siitä osan virtapiiriä. Tämä hankaloittaa mekaanista suunnittelua ja toisaalta johtaa myös häviöiden kasvuun.

Kuvan 26 suntti on virtakiskoon liitettävä malli, mutta sunttirakenteita on myös erilaisia, kuten esimerkiksi koaksiaalinen suntti ja piirilevyllä liitettävä pintaliitossuntti. Suntti voidaan liittää myös esimerkiksi IGBT-moduulin sisälle, jolloin lähtövirtatieto saadaan suoraan IGBT:n lähtösignaalista. Tämä ratkaisu olisi ideaalinen mekaanisessa mielessä, sillä se veisi vähemmän tilaa ja antaisi signaalin suoraan hilaohjainkortille. Kuitenkin IGBT-moduulin sisäisen häviöt kasvaisivat. Tässä työssä keskitytään pelkästään kiskoon liitettävään sunttiin, sillä esimerkiksi IGBT-moduuliin liitettävä suntti on IGBT:n valmistajan asennettava. Lisäksi tämän työn laitteissa pääpiiri ei ole piirilevyllä, joten pintaliitossuntit eivät ole vaihtoehto.



Kuva 26: Esimerkki virtakiskoon liitettävästä suurivirtaisesta sunttivastuksesta [25]

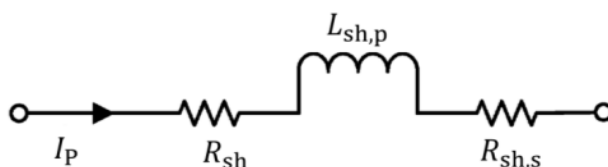
Sunteilla haasteena on tarkkuus pienillä virroilla. Vastuksen yli muodostunut jännite jää pieneksi, jolloin varsinkin termojännitteet voivat vääristää mittaustulosta merkittävästi.

Suntin virta-alueen ylärajan määrittää kuumeneminen (häviöt) ja alarajan määrittää termojännite, nollapistevirhe ja kohina. Suuri vastusarvo kasvattaa mittaustarkkuutta varsinkin pienillä virroilla, mutta rajaa mitattavan virta-alueen pienemmäksi, sillä häviöt suurilla virroilla kasvavat. Lisäksi suuret häviöt voivat aiheuttaa epälineaarisuutta, jos suntin resistanssi ei ole riittävän stabiili lämpötilan suhteen. [16] [26] Suntin häviöteho on

$$P_{sh} = R_{sh} i_p^2, \quad (16)$$

jossa  $R_{sh}$  on suntin resistanssi ja  $i_p$  on suntin läpi kulkeva mitattava virta.

Kuva 27 esittää suntin ekvivalenttisen kytkennän. Suntin nimellisen resistanssin  $R_{sh}$  lisäksi komponentissa on sarjaresistanssi  $R_{sh,s}$  ja parasiittinen induktanssi  $L_{sh,p}$ . Sarjaresistanssin aiheuttaa virranajo, ja parasiittinen induktanssi johtuu mittauselektroniikan johtojen synnyttämän silmukan ja päävirtajohtimen keskinäisinduktanssista. Tämä silmukka on vastaava kuin luvussa 3.2.2 mainittu Hall-elementin jännitemittauspiirin silmukka. Suntissa tämä silmukka on kuitenkin merkittävästi suurempi, sillä mittauspisteiden välinen etäisyys on Hall-elementtiin nähden suuri. Suntin kaistanleveyden siis määrää mittauselektroniikan lisäksi parasiittinen induktanssi. Hyvä mittauselektroniikan suunnittelu ja liitos sekä suntin geometrinen rakenne pienentävät induktanssia.



Kuva 27: Suntin ekvivalenttinen piiri (muokattu lähteestä [21])

Suntin lämpötilariippuvuus on pientä ja vähäinenkin vastuksen muutos lämpötilan funktiona yleensä tunnetaan hyvin valmistajien datalehtien perusteella. Tämä on merkittävä etu, sillä lämpötilan mittausta käytettäessä mittauselektroniikka tai säätöjärjestelmä voi kompensoida lämpötila-ajautumisesta johtuvan virheen. Suntti on kuitenkin herkkä epätasaiselle lämpenemiselle. Jos kaksi erilaista yhteen liitettyä johtavaa materiaalia ovat eri lämmöissä, niiden välille syntyy termojännite. Suntin molemmissa terminaaleissa on kaksi tämänlaista liitosta: resistiivisen materiaalin liitoskohdat kiskostoon ja elektroniikkapiirin liitoskohdat suntin terminaaleihin. Jännitehäviön mittausta tapahtuu kiskosta, jolloin mahdolliset termojännitteet summautuvat vastuksen jännitehäviöön. Termojännite on hyvin pieni jännite, mutta se on suhteellisen suuri suntin häviöjännitteeseen nähden. Eräs epätasaisista lämpenemää aiheuttava tilanne on kuvattu luvussa 2.4.

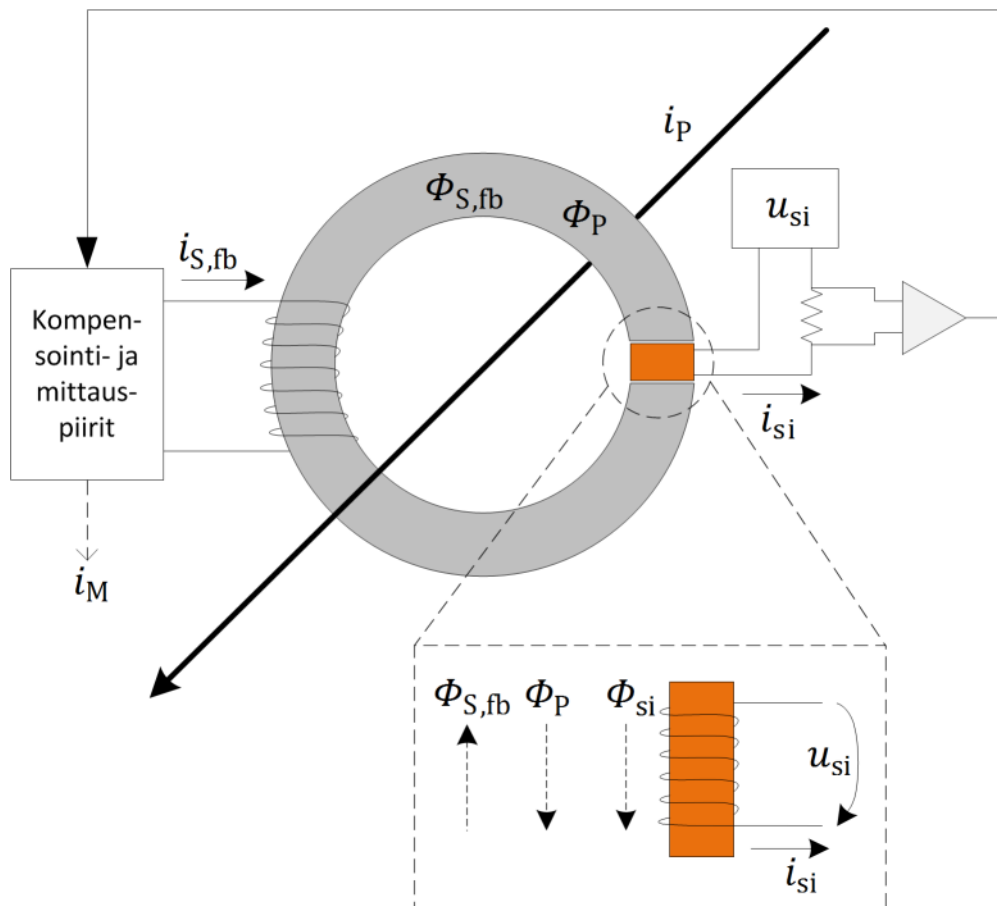
### 3.5 Muita virta-anturityyppejä

Eta-Hall-anturi<sup>2</sup> on kompensoimattoman ja kompensoidun Hall-anturin kombinaatio. Rakenne vastaa kompensoidun rakennetta, mutta nyt Hall-jännitteen vahvistimen ulostuloa ei kytketä takaisin ohjaamaan kompensointivirtaa, vaan se summataan käämityksen sarjavastuksen jännitteeseen. Matalilla taajuuksilla eta-anturi toimii siis kompensoimattomana Hall-anturina ja korkeilla taajuuksilla kompensointikäämitys toimii virtamuuntajana. Tällä menetelmällä saavutetaan kompensoidun Hall-anturin kaistanleveys ja lähes sama tarkkuus. Lisäksi käyttöjännite ja tehonkulutus vastaavat kompensoimatonta anturia. Huonoina puolina ovat hinta ja toimintaympäristön rajoitukset, jotka vastaavat kompensoidun anturin rajoitteita. [17]

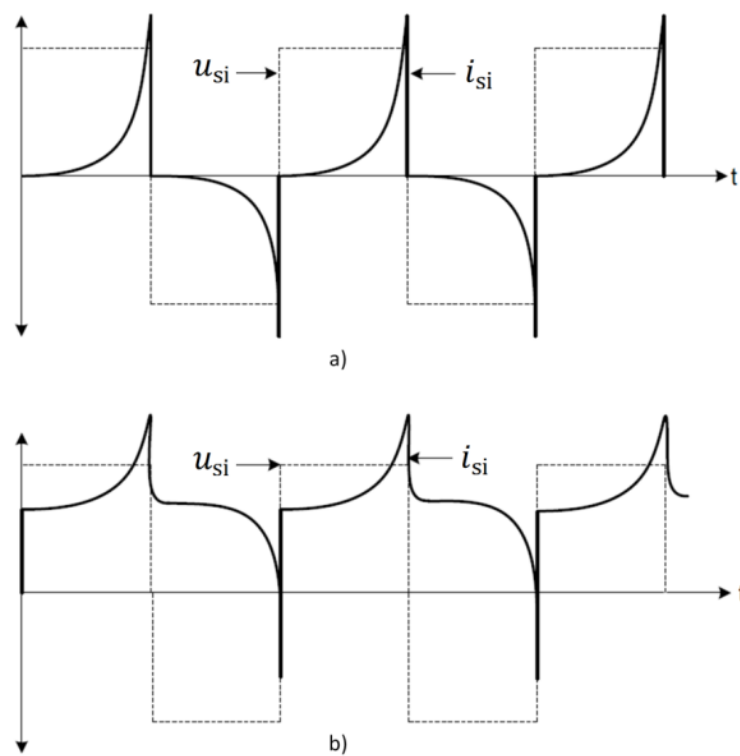
Fluxgate-anturin perusidea on sama kuin Hall-anturilla; ferriitin ilmvälin vuontiheyden mittaaminen. Vuontiheys mitataan käyttämällä kyllästyvää kuristinta. Menetelmä on erittäin tarkka ja lineaarinen. [21] Fluxgate-elementti on kyllästyvä kuristin, jonka induktanssi muuttuu magneettivuontiheyden funktiona. Kuvassa 28 on esitetty yksinkertaisin kompensoitu fluxgate-anturityyppi ja kuvassa 29 tämän anturin fluxgate-elementin virtavaste jänniteherätteeseen eri magneettivuon arvoilla. Herätekäämitys on kierretty magneettisydämen ympärille. Sydän on suunniteltu niin, että se kyllästyy hyvin pienellä magneettivuon tiheydellä. Toisin sanoen fluxgate-elementti näkyy virralle  $i_{si}$  muuttuvana induktanssina. Kun ilmvälin magneettivuo  $\phi_P + \phi_{S,fb} = 0$  ja herätekäämitykseen syötetään jännite  $u_{si}$ , kulkee herätekäämityksessä virta  $i_{si}$  kuvan 29a) mukaisesti. Jos elementti on ulkoisessa kentässä ( $\phi_P + \phi_{S,fb} \neq 0$ ), kulkee herätekäämityksessä virta  $i_{si}$ , jolla on nollapistestä poikkeava keskiarvo, kuten kuvasta 29b) havaitaan. Nollapistepoikkeama on verrannollinen ilmvälin magneettivuohon. Ohjausvirta  $i_{si}$  mitataan esimerkiksi suuntivastuksella. Kompensoidulla anturilla ohjausvirtatietoa käytetään kompensointikäämityksen virran ohjaamiseen ja kompensoimattomalla anturilla ohjausvirtatieto on anturin ulostulosignaali, kuten Hall-anturillakin. [17] [21] [27]

---

<sup>2</sup> Eta tulee symbolista  $\eta$ , tarkoittaen hyötysuhdetta.



Kuva 28: Kompensoitu fluxgate-anturi



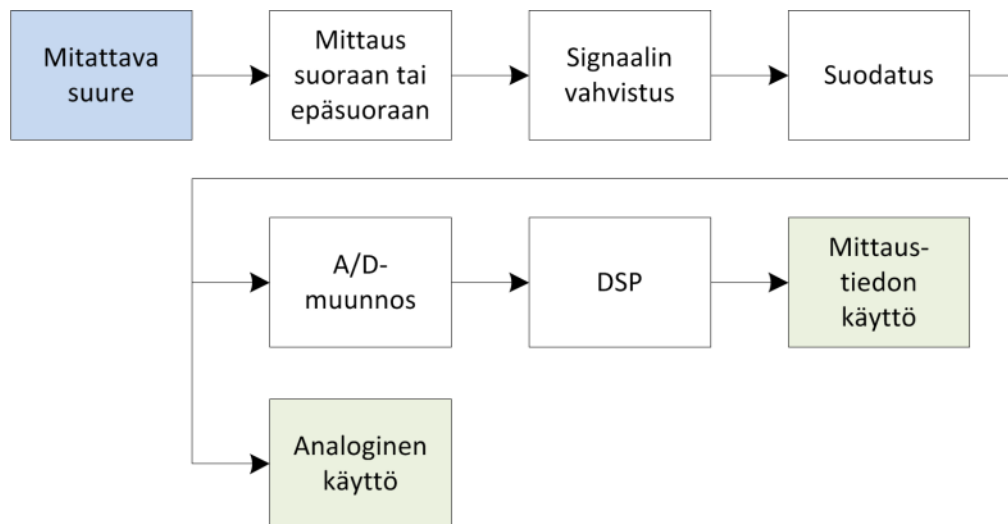
Kuva 29: Fluxgate-elementin virtavaste  $i_{si}$  jänniteherätykseen  $u_{si}$ , kun a)  $i_p = 0$  ja b)  $i_p \neq 0$  (muokattu lähteestä [27])

Kuten jo aiemmin mainittiin, fluxgate voidaan toteuttaa kompensoituna ja kompensoimattomana kuten Hall-anturi. Lisäksi fluxgate-antureissa voidaan tarkkuuden ja kaistanleveyden parantamiseksi hyödyntää virtamuuntajatoimintaa laajemmin käyttäen erillisiä ferriittejä, jotka ovat virtamuuntajakäämityksen sydäminä. Tällöin fluxgate-elementti voidaan tehdä niin, että se muodostaa ilmajälittömän kokoympyrän muotoisen renkaan. Näihin ei tässä työssä mennä syvällisemmin, sillä fluxgate-anturi ei vielä ole ratkaisu raskaiden työkoneiden sähkökäyttöjen ympäristöön. Sillä on samat ongelmat kuin kompensoidulla Hall-anturilla, minkä lisäksi sen koko on merkittävästi suurempi, jos lisäferriittejä käytetään. Lisäferriittien käyttö on pakollista hyvän kaistanleveyden saavuttamiseksi. Tämä tarkoittaa monimutkaisempaa ja kalliimpaa anturityyppiä tässä esitettyyn perusratkaisuun verrattuna. [17] [21] [28] Fluxgate-anturi on kuitenkin mahdollinen ratkaisu tulevaisuudessa, mutta fluxgate-teknologian on kehitettävä merkittävästi, jotta se soveltuisi tämän työn käyttöympäristöön.

Muita mainittavia anturityyppejä ovat MR-anturit (engl. magneto resistance effect), erilaiset optiset anturit, kuten esimerkiksi valon polarisaatioon tai interferenssiin perustuvat menetelmät, ja Rogowski-käämit. [21] Nämä ovat kuitenkin hinnan, mittausalueen ja toimintaympäristön puolesta epäkäytännöllisiä ja jopa mahdottomia ratkaisuja tämän työn kannalta. Virtamuuntaja on osa kompensoituja magneettisia antureita, mutta pelkkää virtamuuntajaa ei voida käyttää muun muassa sen johdosta, että sillä ei voida mitata tasasähköä, koska mittaustapa perustuu kokonaan induktion hyödyntämiseen. Sama pätee myös Rogowski-käämiin.

### 3.6 Mittaussignaalin käsittely ja mittauselektroniikka

Anturin mittaama virtatieto täytyy saada riittävän virheettömästi mittaustietoa tarvitseville piireille ja ohjelmistoille. Tämä on haastavaa varsinkin tehoelektroniikkalaitteen sisällä. Vaihtosuuntaajassa lähtövirtakiskoissa kulkee suuri vaihtovirta, joka synnyttää muuttuvan magneettikentän. Tasasähkömuuttajan lähtövirran rippeli voi olla jopa sata ampeeria huipusta huippuun virta-anturin kohdalla. Lisäksi molemmissa tapauksissa sähkökentän muutokset ovat voimakkaita, sillä IGBT:t kytkevät lähtövirtakiskoon jatkuvasti muuttuvan jännitteen, jonka amplitudi voi olla esimerkiksi 700 voltia. Tehoelektroniikkalaitteen valmistaja ei voi juuri vaikuttaa virta-anturin sisäiseen elektroniikkaan, mutta virta-anturin ulostulon ja tiedon kohteen väliseen järjestelmään suunnittelija voi vaikuttaa. Tässä työssä tutkittavien virta-antureiden häiriintymistavat ovat keskenään varsin erilaisia. Hall-anturin signaali häiriintyy todennäköisemmin analogisen signaalin johtimeen indusoituvan jännitteen vuoksi. Sunnivastukseen liitettävät mittaussjohtimet muodostavat silmukan, joka altistuu mitattavan virran muodostamalle voimakkaalle magneettikentälle. Kummankin anturityypin käyttöjännitejohtimiin voi kytkeytyä häiriöitä induktiivisesti ja galvaanisesti [15] [29]. On siis selvää, että anturin hyvän suorituskyvyn lisäksi, sen mittaussignaalin laadun säilyttäminen on hyvin oleellista. Kuvassa 30 on esitetty esimerkki mittaussignaalin käsittelystä.



Kuva 30: Mittauksen lohkokkaavio

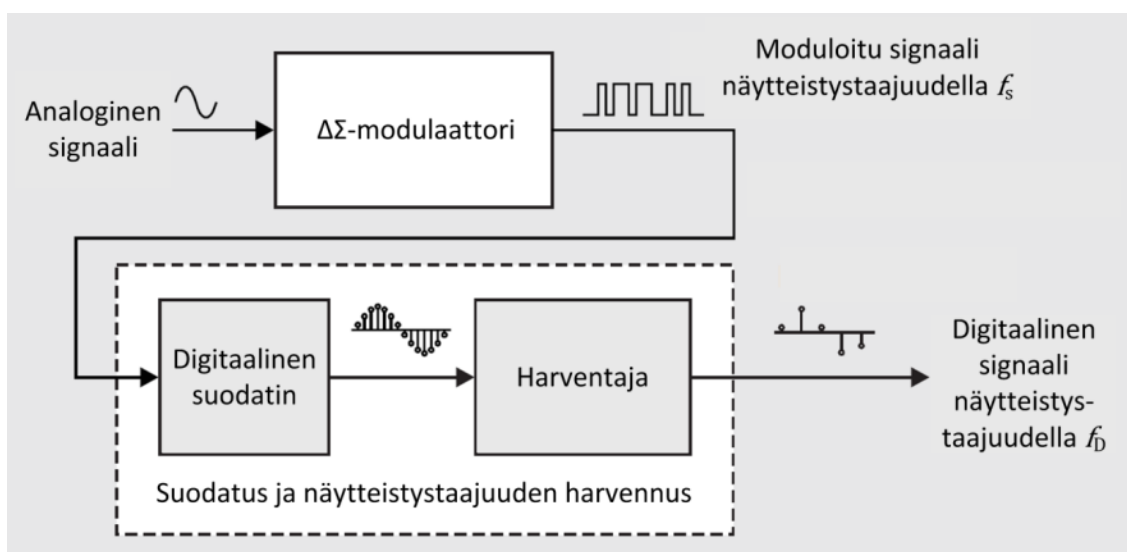
Mitattava suure mitataan joko suoraan tai epäsuoraan. Virranmittaus on aina epäsuora mittausta, sillä esimerkiksi Hall-anturi mittaa virran synnyttämää magneettikenttää ja suntti mittaa vastuksen yli olevaa jännitehäviötä. Useasti signaali on tarpeen vahvistaa sopivalle tasolle ja suodattaa halutulle taajuuskaistalle. Tämän työn sovelluksissa säätö on aina digitaalista, joten signaalin AD-muunnos on tarpeen. Tämän jälkeen digitaalista signaalia voidaan vielä käsitellä digitaalisella signaaliprosessorilla (DSP) tai säätöpiirin prosessorilla ennen signaalin varsinaista käyttöä. Signaalia voidaan käyttää myös analogisesti, jos joidenkin toimintojen toteutus on järkevämpää toteuttaa analogisesti, tai jos esimerkiksi AD-muunnos on liian hidas. Analogisen mittaussignaalin käyttöesimerkkejä ovat ylivirta- ja mahdollisesti käytettävä oikosulkusuojaus, jolloin mittaussignaalia voidaan verrata komparaattorilla johonkin referenssitasoon. Tason ylittyessä komparaattori antaa diskreetin signaalin, joka kertoo oikosulkuvirtarajan ylittyneen.

Kuvan 30 tapauksessa eräs yleinen käytäntö on se, että suodatuspiiri ja sen jälkeiset lohkot ovat ohjauskortilla. Toisin sanoen analoginen mittaussignaali tuodaan sellaiseen johtimien pitkin piirikortille, jossa AD-muunnos toteutetaan. Menetelmä on yksinkertainen, mutta varsinkin taajuusmuuttajan sisällä kulkevat johtimet altistuvat voimakkailla sähkömagneettisille kentille. Näin ollen AD-muunnos on hyvä tehdä mahdollisimman lähellä mittauspistettä. Ideaalisinta on integroida AD-muunnospiiri anturielektroniikkaan. Digitaalinenkin signaali voi häiriintyä, mutta diskreetin luonteensa vuoksi se sietää häiriöitä paremmin kuin analoginen jännitesignaali, johon indusoitunut häiriöjännite aiheuttaa informaation vääristymistä. Seuraavaksi esitellään eräs tapa toteuttaa AD-muunnos anturielektroniikalla.

Tässä työssä tutkittavan sunttivirta-anturin ulostulo on  $\Delta\Sigma$ -modulointia (delta-sigma) yksibittistä bittivirtaa.  $\Delta\Sigma$ -modulaatio on eräs tapa esikäsitellä mitattava suure AD-muunnosta varten. Periaatteessa  $\Delta\Sigma$ -modulointu signaali on jo digitaalisessa muodossa, mutta sen näytteistystaajuus on tarpeettoman korkea.  $\Delta\Sigma$ -modulaation etu on siinä, että

sillä voidaan mitata korkealla resoluutiolla matalataajuisia signaaleja, koska modulaattorin korkea näytteistystaajuus synnyttää merkittävää kvantisointikohinaa vain korkeille taajuuksille. Kohina voidaan suodattaa pois ilman, että suodatus vaikuttaa mitattavaan signaaliin. Tavallisessa AD-muunnoksessa kvantisointikohina näkyy spektrissä tasaisena kaikilla taajuuksilla, mikä huonontaa mittausrésoluutiota mitattavan signaalin taajuusalueella. Varsinkin sunteissa, joiden resistanssi on hyvin pieni, tarvitaan hyvä signaalinkäsittelymenetelmä, jotta resoluutio saataisiin pysymään hyvänä. Seuraavissa kappaleissa esitetään ensimmäisen kertaluvun  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin toimintaperiaate. Yleensä kuitenkin käytetään korkeamman kertaluvun  $\Delta\Sigma$ -modulaattoreita, jolloin kvantisointikohina kasvaa korkeilla taajuuksilla, mutta pienenee merkittävästi matalilla taajuuksilla [30].

Kuvassa 31 on esitetty  $\Delta\Sigma$ -modulaatioon perustuvan AD-muunnoksen toimintaperiaate.  $\Delta\Sigma$ -modulaattori muuttaa analogisen signaalin yksibittiseksi bittivirraksi, jossa informaatio on jännitepulssin leveydessä. Käytännössä siis aina yhden kellojakson ajan näytteistetyn signaalin hetkellisarvo on verrannollinen bittivirran pulssisuhteeseen. Tämä merkittävästi ylinäytteistetty signaali suodatetaan digitaalisella suodattimella, minkä jälkeen näyteväliä harvennetaan. Tällöin saadaan matalataajuinen ja korkea-resoluutioinen digitaalinen signaali. Yksibittisen bittivirran näytteistystaajuus  $f_S$  on suuri verrattuna AD-muunnetun signaalin näytetaajuuteen  $f_D$  ( $f_S \gg f_D$ ). Toisin sanoen harvennussuhde (engl. decimation ratio)  $D = f_S/f_D$  on suuri. [30] Käyttösovellus määrää harvennussuhteen tarpeen, sillä harvennussuhteen kasvattaminen vaikuttaa useisiin ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi signaalin ylärajataajuuteen. Taulukossa 1 on esitetty esimerkkejä erään  $\Delta\Sigma$ -modulaatioon perustuvan AD-muunnoksen suorituskyvystä eri harvennussuhteilla.

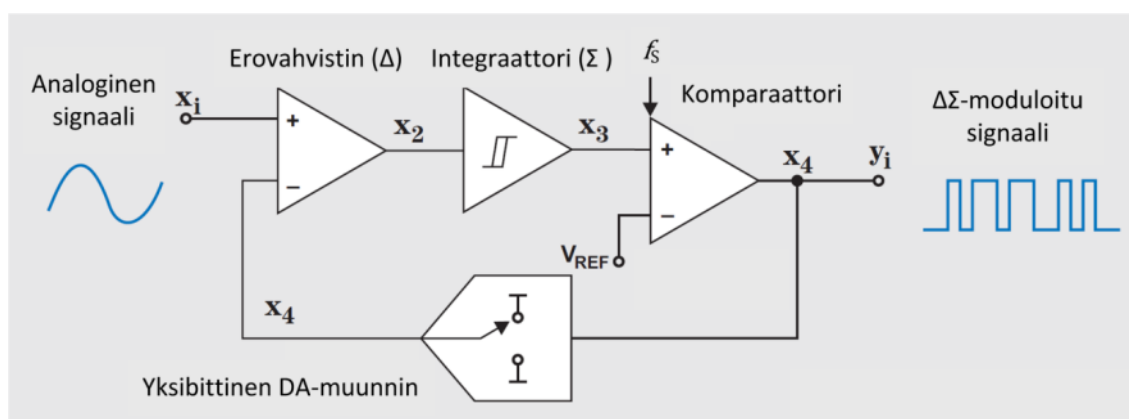


Kuva 31:  $\Delta\Sigma$ -modulaatioon perustuva AD-muunnos (muokattu lähteestä [30])



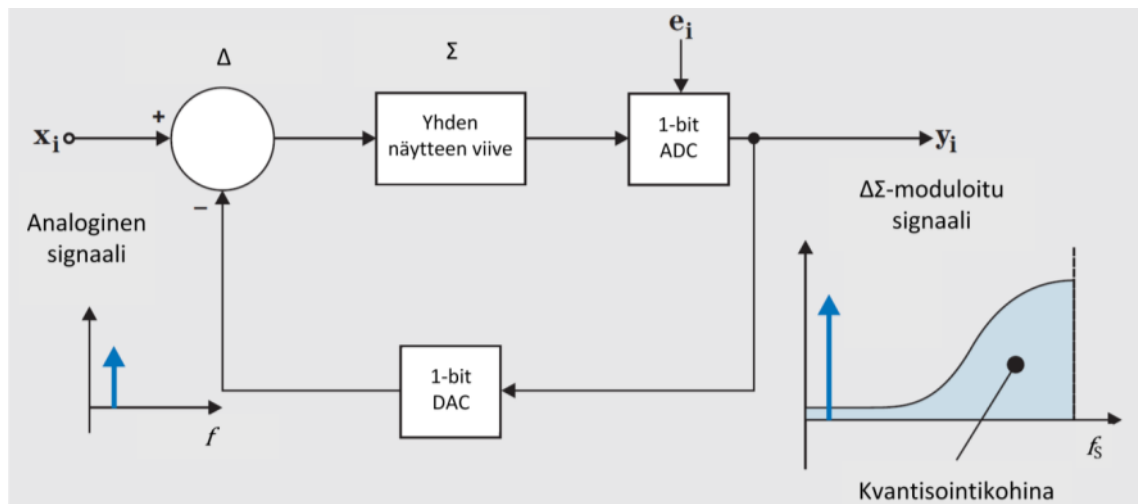
Taulukko 1: Texas Instrumentsin toisen kertaluvun  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin ADS1202 suorituskyky  $\text{Sinc}^3$ -suodatuksella [31]

Suodatuksen harvennus-suhde $D$	$\Delta\Sigma$ -modulaattori	Digitaalinen suodatin		
	Ideaalinen signaali-kohinasuhde $SNR$ [dB]	Näytteistys-taajuus $f_{S,f}$ [kHz]	Resoluutio [bit]	Yläraja-taajuus $f_{BW}$ [kHz]
4	24,99	2500,0	6	655
8	40,04	1250,0	9	327,5
16	55,09	625,0	12	163,7
32	70,14	312,5	15	81,8
64	85,19	156,2	18	40,9
128	100,24	78,1	21	20,4
256	115,30	39,1	24	10,2



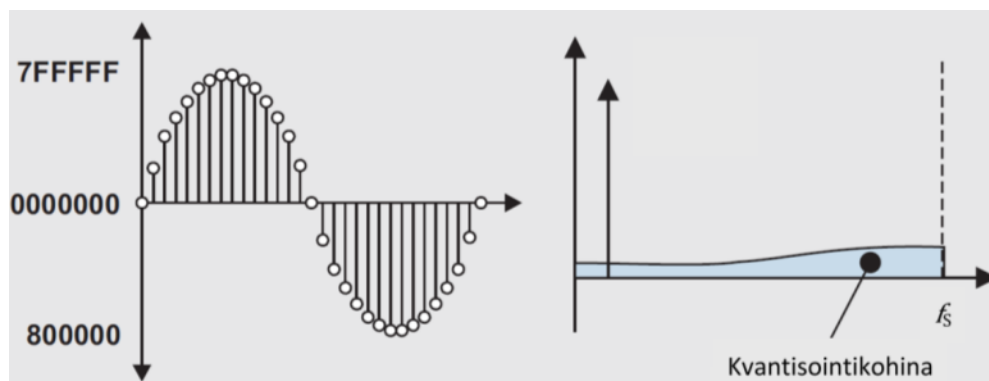
Kuva 32:  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin lohkokkaavio (muokattu lähteestä [30])

Kuvassa 32 on esitetty ensimmäisen kertaluvun  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin toimintaperiaate. Kertaluvun määrää erovahvistin-integraattoriparien lukumäärä. Erovahvistin vahvistaa näytteistettävän analogisen signaalin  $x_i$  ja yksibittisen DA-muuntimen signaalin  $x_4$  erotuksen signaaliksi  $x_2$ . Integraattorin signaali  $x_3$  joko kasvaa tai laskee riippuen signaalin  $x_2$  arvosta ja etumerkistä. Tämän jälkeen näytteistystaajuuteen  $f_s$  tahdistettu komparaattori vertaa jokaisella kellojaksolla signaalia  $x_3$  referenssitason  $V_{ref}$  saaden aikaan yksibittisen lähtösignaalin  $x_4$ . Kun komparaattorin tila muuttuu, myös takaisinkytkennässä olevan yksibittisen DA-muuntimen tila muuttuu. Tämä saa aikaan muutoksen signaalissa  $x_2$ , jolloin integraattori kääntää signaalin  $x_3$  muutossuunnan. Kuvassa 33 on taajuusalueen esitys  $\Delta\Sigma$ -modulaattorista. Kuvassa nähdään myös kvantisointikohinan sijoittuminen signaalitaajuutta korkeammille taajuuksille. Kuvan tapauksessa esimerkkinä on käytetty sinisignaalia. [30]



Kuva 33:  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin taajuustason lohkokkaavio (muokattu lähteestä [30])

Yksibittinen bittivirta suodatetaan keskiarvoistavalla digitaalisella alipäästösuodattimella, jolloin saadaan kuvan 34 mukainen näytejono näytteistystaajuudella  $f_s$ . Nyt signaali ei ole enää yksibittistä, vaan jokainen näyte koostuu valitun resoluution mukaisesta bittimäärästä. Kuvasta 34 nähdään myös alipäästösuodattimen vaikutus kvantisointikohinaan. Suodatus ei vaikuta mitattavaan signaaliin. Näytteistystaajuus on turhan suuri, sillä se vaatisi erittäin nopean signaaliprosessorin. Lisäksi hyötysignaali on niin matalalla taajuudella, että Nyquistin kriteeri täyttyisi näytteistystaajuudella  $f_s$  moninkertaisesti. On tärkeää huomioida myös se, että suodatettu korkeataajuinen signaali on alipäästösuodatettua, mikä tarkoittaa sitä, että suuritaajuinen signaali ei sisällä hyödyllistä informaatiota verrattuna matalampitaajuiseen signaaliin. [32]

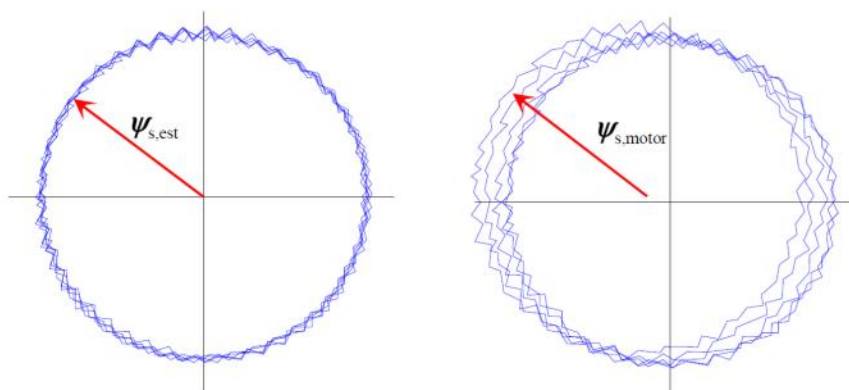


Kuva 34: Digitaalisesti suodatettu signaali (muokattu lähteestä [32])

Kuten kuvassa 31 on esitetty, korkeataajuinen suodatettu signaali käsitellään harventajalla (engl. decimator), joka valitsee määrätyn ajan välein näytteitä. Jos esimerkiksi harvennussuhde  $f_s/f_D = 10$ , valitsee harventaja vain joka kymmenennen näytteen. Kunhan harvennuksen jälkeinen signaali täyttää Nyquistin kriteerin, sisältää harvennettu signaali saman informaation kuin harventamaton signaali. Harvennussuhde määrittää kuinka paljon kohinaa lopullinen signaali sisältää. [32]

### 3.7 Anturien epäideaalisuuksien vaikutuksia

On selvää, että moottorisäädössä nopeus ja momentti täytyy kyetä hallitsemaan mahdollisimman tarkasti. Varsinkin raskaissa ajoneuvokäytöissä, kuten esimerkiksi linja-autoissa, momenttisäädön hyvä tarkkuus on oleellinen ominaisuus, sillä momentin värähtelemättömyys ja tasaisuus tuovat matkustusmukavuutta. Työkonekäytöissä momentin hyvä laatu on tärkeä ominaisuus, sillä koneen käyttäjän työskentelymukavuuden lisäksi tärinätön sähkökäyttö pidentää kaikkien mekaanisten ja elektronisten komponenttien käyttöikää. Lisäksi tärinättömyys vähentää melua, joka on muutenkin ongelma esimerkiksi kaivoksissa ja tunnelien louhintatyömailla.



Kuva 35: Staattorivuovektorin ajautuminen (muokattu lähteestä [5])

Kuvassa 35 on esitetty staattorivuovektorin ajautuminen pois origosta. Tämä johtuu virheistä staattorivuon estimoinnissa. Luvussa 2.3.1 esitetty yhtälö (1) kuvaa yhteyttä mitattujen jännite- ja virtavektoreiden ja staattorivuon välillä. Staattorivuon estimaattivirhe on suoraan verrannollinen jännitteen mittausrvirheeseen, staattoriresistanssin estimointivirheeseen ja staattorivirran mittausrvirheen neliöön. Virheet mittauksissa johtavat virheisiin momenttiestimaatissa. [5] Eri virranmittauksen virhetyyppien vaikutuksia esitellään seuraavaksi lyhyesti.

Hitaasti pyörivissä moottoreissa ja niiden liikuttamissa järjestelmissä esiintyy jo mekaanisenkin rakenteen johdosta värähtelyjä. Jos tuotetussa momentissa on värähtelyä ja rippeliä, voivat rakenteen värähtelyt lisääntyä merkittävästi varsinkin, jos vaihtosuuntaajan lähtötaajuus tai moottorin mekaaninen kulmanopeus ovat jollakin mekaanisen järjestelmän värähtelytaajuudella. Lisäksi askelmaisen vääntömomentin muutoksen herättämät momenttivärähtelyt voivat osua jollekin mekaaniselle värähtelytaajuudelle. Virta-anturien epäideaalisuudet ovat merkittävimmät momentti-rippelin aiheuttajat. [9] [18]

Kestomagneettitahtikoneen estimoitu staattorivuo on

$$\psi_{s,est} = \int (\mathbf{u}_{s,meas} - \mathbf{i}_{s,meas} R_{s,est}) dt, \quad (17)$$

jossa  $\mathbf{u}_{s,est}$  on estimoitu staattorijännitevektori,  $\mathbf{i}_{s,meas}$  on mitattu staattorivirtavektori ja  $R_{s,est}$  on estimoitu staattoriresistanssi. Momenttiestimaatti on [3]

$$T_{e,est} = \frac{3}{2} p \text{Im}\{\mathbf{i}_{s,meas} \boldsymbol{\psi}_{s,est}\}. \quad (18)$$

Yhtälöistä (17) ja (18) havaitaan, että virta on suuressa roolissa momentin arvioinnissa. Myös niin sanotussa moottorin ID-ajossa mitattu staattoriresistanssin  $R_{s,est}$  arvo on riippuvainen virranmittauksen tarkkuudesta. Toki yhtälöstä (17) havaitaan, että myös staattorijännitevektorin arvio vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Tätä ei kuitenkaan tämän työn puitteissa tarkastella.

Kuten jo aiemmin on mainittu, vain kahta vaihevirtamittausta käytetään moottorisäädössä. Kolmas vaihevirta lasketaan näistä mittauksista. Tämä aiheuttaa suuremman virheen virranmittaukseen kuin kolmesta vaiheesta mitattu virta [16]. Tarkastellaan nollapistepoikkeaman vaikutusta virtavektoriin. Käytettävät mittaussuureet ovat A- ja B-vaiheiden virrat

$$\begin{cases} i_{am} = i_a + \Delta i_a \\ i_{bm} = i_b + \Delta i_b \end{cases} \quad (19)$$

jossa  $i_{am}$  ja  $i_{bm}$  ovat mitatut virrat, jotka koostuvat todellisista virroista  $i_a$  ja  $i_b$  ja nollapistepoikkeamavirheistä  $\Delta i_a$  ja  $\Delta i_b$ . Kolmivaihejärjestelmän symmetrisyydestä saadaan C-vaiheen virta

$$i_{cm} = -(i_{am} + i_{bm}) = -(i_a + i_b) - (\Delta i_a + \Delta i_b). \quad (20)$$

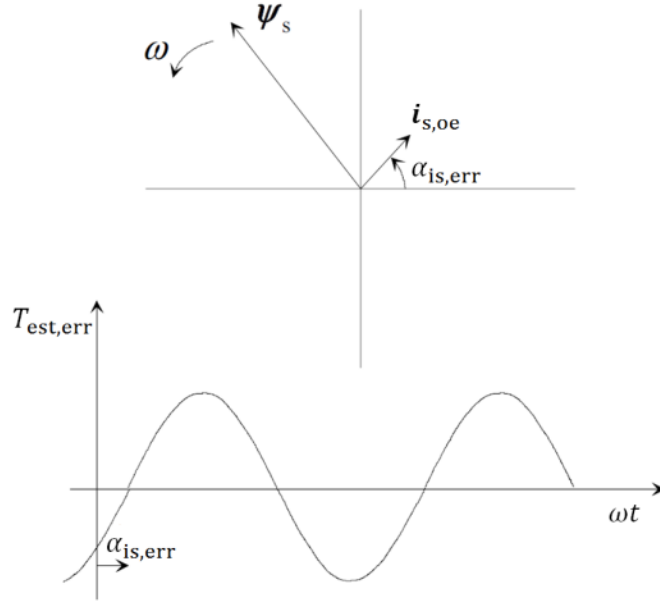
Kun mitatut virrat sijoitetaan staattorivirtavektorin yhtälöön (2), saadaan virhevektori

$$\mathbf{i}_{s,oe} = \frac{2}{3} \left( \Delta i_a e^{j0} + \Delta i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + (-\Delta i_a - \Delta i_b) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right). \quad (21)$$

Virhevektori voidaan esittää myös muodossa

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{s,oe} = i_{s,oe} e^{j\alpha_{is,err}} \\ \alpha_{is,err} = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta i_a + 2\Delta i_b}{\sqrt{3}\Delta i_a} \right) \end{cases} \quad (22)$$

Kuvan 36 yläosassa esitetty nollapistevirhevektori  $\mathbf{i}_{s,oe}$  on staattinen. Se aiheuttaa kuvan 36 alaosassa esitetyn virran lähtötaajuisen momenttiestimaattivirheen  $T_{est,err}(\omega t)$ . [9]



Kuva 36: Nollapistepoikkeaman aiheuttama virhevektori  $\mathbf{i}_{s,oe}$  ja momenttiestimaattivirhe  $T_{est,err}(\omega t)$

Mitatut virrat voivat sisältää myös vahvistusvirheen:

$$\begin{cases} i_{am} = i_a(1 + G_{e,a}) \\ i_{bm} = i_b(1 + G_{e,b}) \end{cases} \quad (23)$$

jossa  $G_{e,a}$  ja  $G_{e,b}$  ovat vahvistusvirheet. Kuten nollapistepoikkeamalle, vahvistusvirheelle voidaan johtaa vastaavasti virhevektori

$$\mathbf{i}_{s,ge} = \frac{2}{3} \left( G_{e,a} i_a e^{j0} + G_{e,b} i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + (-G_{e,a} i_a - G_{e,b} i_b) e^{j\frac{2\pi}{3}} \right), \quad (24)$$

jossa  $\mathbf{i}_{s,ge}$  on vahvistusvirhevektori, joka aiheuttaa momenttiestimaattivirheen nollapistepoikkeaman tavoin. Kuitenkin nyt momenttiestimaattivirheen taajuus on kaksinkertainen perustaajuuteen nähden:  $T_{est,err}(2\omega t)$ . [9]

Kuten luvussa 3.1 esitettiin, integraalinen lineaarisuusvirhe näkyy vahvistusvirheenä, joka muuttuu virran funktiona. Näin ollen lineaarisuusvirhe vaikuttaa vahvistusvirheen tavoin. Lisäksi AD-muunnos aiheuttaa nollapistepoikkeaman, jonka suuruutta on vaikea arvioida. Myös esimerkiksi analogiseen signaaliin kytkeytyvät häiriöt voivat näkyä lineaarisuusvirheinä. On selvää, että lineaarisuusvirhe on hankalampi hallita, kuin edellä esitetyt yksinkertaisemmat virhetypit.

Edellä esitetyt virranmittausvirheet aiheuttavat virheen momenttiestimaattiin kuvan 36 mukaisesti. Säätojärjestelmä yrittää kompensoida momenttia vastakkaiseen suuntaan, mikä aiheuttaa vastaavan virheen todelliseen momenttiin. Momenttisäätövirhe havaitaan muun muassa tärinänä ja meluna. Tahtikoneen anturittomalla säädöllä momentin

säätövirhe voi aiheuttaa myös asentovirheen ja sitä kautta momentin säätövirheen. Tämä voi näkyä muun muassa hyvin epätasaisena pyörimisnopeutena pienillä nopeuksilla.  
[16]

## 4 Tutkittavat virta-anturit

Luvussa 4.1 esitellään virta-antureille asetettavat suorituskyky- ja ympäristövaatimukset. Luvussa 4.2. esitellään tässä työssä tutkittavat anturit. Tutkittavana suuntina on eräs prototyypisuntti, jossa on suuntivalmistajan oma elektroniikka. Mittauselektronikassa on digitaalilähdön päävirtakiskopotentiaalista erottava  $\Delta\Sigma$ -modulaattori. Lisäksi käyttöjännite viedään analogielektronikalle erottavalla hakkurilla. Samaan suuntiin on liitetty lisäksi toisen valmistajan prototyypielektronikka, joka käyttää myös erottavaa  $\Delta\Sigma$ -modulaattoria mittaussignaalin AD-muunnokseen ja galvaaniseen erottamiseen. Tutkittava kompensoimaton Hall-anturi on kaupallinen ajoneuvo- ja työkonenäkökäyttöihin tarkoitettu LEM HAH1DR 900-S, jonka mittaussignaali on analoginen.

### 4.1 Virta-anturille asetettava vaatimukset

Virta-anturille asetettavat vaatimukset eivät ole yksiselitteisiä. Koko virranmittausketjulle voidaan asettaa vaatimukset, jonka jälkeen on tarkasteltava virta-anturin osuutta kokonaisvirranmittausketjusta. Tarkkuusvaatimuksissa virta-anturi on kriittinen tekijä, sillä muu elektroniikka voidaan suunnitella riittävän tarkaksi. Viiveisiin ja vasteaikoihin liittyvät vaatimukset on asetettava tiukoiksi, sillä mittausketjussa signaalin prosessointi tuo viivettä.

Virranmittausalue on helppo määritellä suurimman laitteen virtavaatimusten kautta. Kuitenkaan muita vaatimuksia ei ole yhtä helppo määritellä. Tässä työssä lineaarisuus-, vahvistus- ja nollapistevirhe määritellään suhteessa anturin nimelliseen virtaan. Kuitenkin moottorisäädön kannalta oleellisempaa on virhe suhteessa moottorin nimelliseen virtaan [33]. On selvää, että jos esimerkiksi 1000  $A_{RMS}$ :n virta-anturia käytetään mittaamaan sellaisen moottorin virtaa, jonka nimellisvirta on 600  $A_{RMS}$ , kasvaa anturin suhteellinen virhe moottorisäädön näkökulmasta. Koska tässä työssä ei tutkita anturin mitoitus, vaan anturin suorituskykyä, määritellään virheet suhteessa anturin nimellisvirtaan, kuten jo aiemmin mainittiin. Seuraavaksi esitellään virta-antureille asetettavat vaatimukset. Taulukossa 2 on esitetty kootusti yhteenveto virta-anturien suorituskyky- ja tarkkuusvaatimuksista.

Jos käytetään tehotransistorien kytkentöjä ohjaavan modulaattorin kantoaaltoon tahdistettua virranmittausta, virta-anturin signaalia ei suodateta. Tällöin virta-anturin kaistanleveyden tulee olla suuri. Tässä työssä käytetään tahdistamatonta virranmittausta. Koska mittauksen kaistanleveyden ei tarvitse olla suuri, Hall-anturien analoginen signaali alipäästösuodatetaan ennen AD-muunnosta. Suodatuksen aikavakio on luokkaa 20 - 25  $\mu s$ . Tästä saadaan kaistanleveydeksi

$$BW = \frac{1}{20 \mu s \dots 25 \mu s} = 40\,000 \dots 50\,000 \frac{\text{rad}}{s} = 6\,366 \dots 7\,958 \text{ Hz} . \quad (25)$$

Kuten yhtälöstä (25) huomataan, kaistanleveys on melko alhainen. Kuitenkin virta-anturin kaistanleveyden tulisi olla dekadin verran suurempi, sillä anturin on kyettävä toistamaan kytkinkääntöjen yhteydessä rippelivirrassa esiintyviä suuritaajuisia värähtelyjä, vaikka suodatuksen kaistanleveys onkin matala. Anturin päästökaista keskiarvoistaa ylärajataajuutta suuremmat värähtelyt. [33] Moottorisäätö toimii myös pienemmällä virta-anturin kaistanleveydellä, mutta jotkin värähtelyt voivat jäädä mittaamatta. [14] Virta-anturin kaistanleveyden minimivaatimukseksi asetetaan 30 kHz. Suosituskaistanleveys on 80 kHz.

Vaste- ja reagointiaikavaatimukset koko virranmittausketjulle on 10 - 20  $\mu$ s. Suurimmat viiveen aiheuttajat ovat AD-muunnos ja digitaalinen dataväylä. Näiden aiheuttama viive voi olla jo lähellä kymmentä mikrosekuntia. Jos vasteaika pysyy kohtuullisena ja vasteaika tiedetään, säätö toimii riittävän hyvin. [33] Virta-anturille asetetaan vasteaika-vaatimukseksi 10  $\mu$ s. Suntain signaalin käsittelyssä FPGA:lla voidaan päästä pienempiin viiveisiin, koska suntain signaali on valmiiksi digitaalisessa muodossa. Näin ollen suntain vasteaika voi olla pidempikin; 10 - 15  $\mu$ s.

Tyypillisesti tarkkuusvaatimuksissa puhutaan erikseen absoluuttisesta tarkkuudesta ja nollapistepoikkeama- ja vahvistusvirheestä. Nollapistepoikkeama on haitallisempi virhetyyppi, mutta se voidaan kompensoida nollavirtatilassa. Oleellista on se, että nollapistepoikkeama on stabiili käyttöolosuhteiden muutoksissa. Esimerkiksi nollapistepoikkeaman lämpötilaryömintää ei voida kompensoida ilman, että anturin lämpötilaa mitataan ja lämpötilaryömintä tunnetaan. Tarkkuus määritellään nimellisellä virralla vääntömomentin tarkkuuden kautta. Tavoitteena on, että momentin virhe on korkeintaan 5 % ja momentin lineaarisuusvirhe on korkeintaan 3 %. [33] Koska virranmittausketjun tarkkuus voidaan olettaa hyväksi, asetetaan anturille vahvistusvirhevaatimukseksi korkeintaan 5 % ja lineaarisuusvirhevaatimukseksi korkeintaan 2 %. Lisäksi nollapistepoikkeaman on oltava stabiili käyttöolosuhteiden muutoksissa. Lisävaatimus nollapistepoikkeamalle on se, että poikkeama on kaikissa olosuhteissa korkeintaan  $\pm 30$  A.

Anturien toimintaympäristö on vaativa. Anturin on toimittava ympäristössä, jonka lämpötila-alue on  $-40$  °C -  $90$  °C. Lisäksi Hall-anturin lävistävän kiskon tai suntain terminaalien kiskoliitosten lämpötila-alue on  $-40$  °C -  $105$  °C. Virta-anturi altistuu myös tärinälle ja erilaisille kemikaaleille. Myös tehoelektroniikkamoduulin sisällä kylmissä olosuhteissa kondensoituva vesi on otettava huomioon. Tässä työssä tutkitaan suorituskykyä vain eri lämpötiloissa, joten tärinälle, kosteudelle ja kemikaaleille ei aseteta vaatimuksia.

Anturin lineaarisen mittausalueen on oltava vähintään  $900 A_{RMS}$ , jolloin huippuvirran arvo on  $\pm 1273$  A. Lisäksi anturilla on kyettävä mittaamaan ylivirtoja, mutta tällöin mittauksen ei tarvitse olla täysin lineaarinen. Maksimivirtavaatimukseksi asetetaan

$$\hat{I}_{max} = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 900 \text{ A} = 1782 \text{ A} \approx 1800 \text{ A}. \quad (26)$$



Taulukko 2: Virta-anturien suorituskyykyvaatimukset

Ominaisuus	Vaatus
Nimellinen mittausalue	900 A <sub>RMS</sub>
Nimellinen huippuvirta	1273 A
Hetkellinen ylivirta	1800 A
Kaistanleveys	30 kHz (suositus 80 kHz)
Vasteaika	10 $\mu$ s
Nollapistepoikkeama (max)	$\pm 30$ A
Nollapistepoikkeaman muutos (max)	4,0 A
Vahvistusvirhe (max)	5 %
Vahvistusvirheen muutos (max)	5 % yks.
Lineaarisuusvirhe (max)	2 %
Lineaarisuusvirheen muutos (max)	ei vaatimusta
Ympäristön lämpötila	-40 °C - 90 °C
Virtakiskon lämpötila	-40 °C - 105 °C
Epätasaisen lämpenemän aiheuttama virhe (suntti)	$< \pm 2,0$ A, kun $\Delta t \leq 7,0$ °C

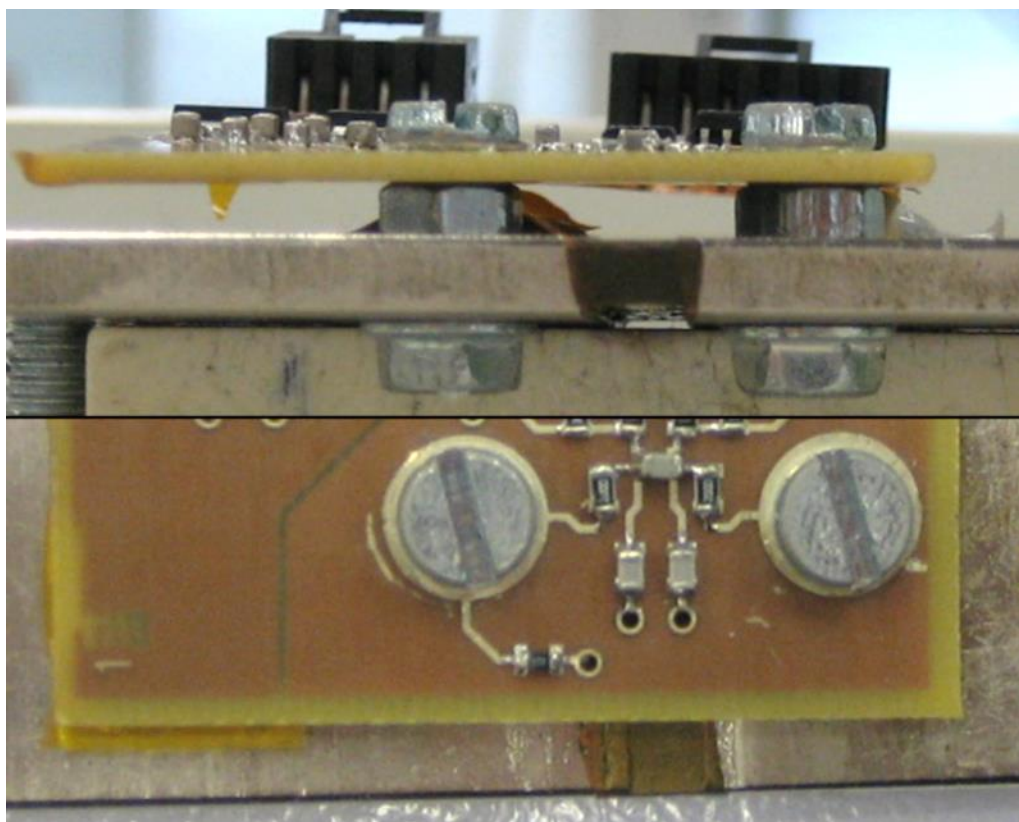
Muita virta-anturin valinnassa asetettavia vaatimuksia tai huomioitavia asioita:

- Mittaussignaali on galvaanisesti erotettava päävirtakiskosta.
- Tärinä, kosteus, korroosionsieto on huomioitava.
- Mittaussignaalin on hyvä olla digitaalinen, jotta signaali häiriintyisi mahdollisimman vähän anturin ja ohjauselektronikan välillä. Lisäksi ohjaus- ja säätöelektronikan hinnassa säästetään, jos siihen ei tarvitse tehdä AD-muunnospiiriä.
- Virta-anturin on oltava EMC-yhteensopiva tehoelektronikkamoduulin käyttöympäristön vaatimuksien kanssa.
- Virta-anturin on täytettävä vaadittavat hyväksynät (esimerkiksi UL ja CE). Ajoneuvosähkökäyttövaatimukset korostuvat tässä tapauksessa.

## 4.2 Tutkittavat virta-anturit

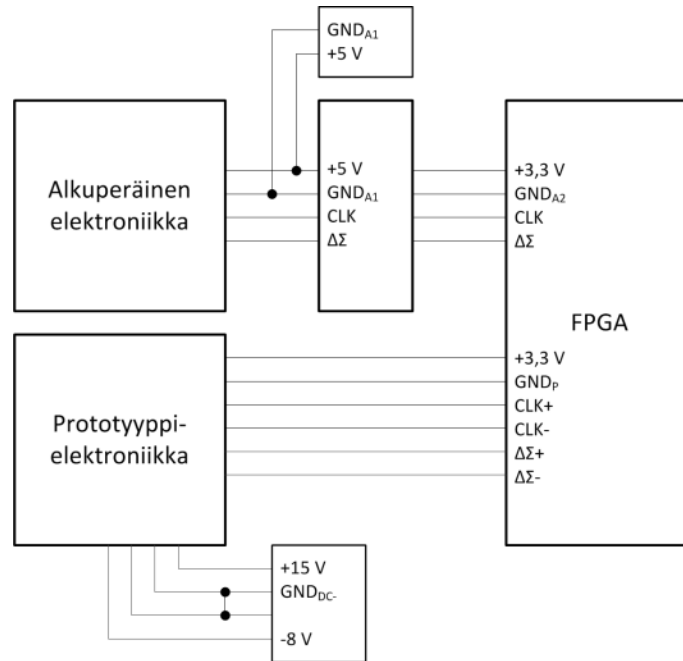
Tutkittava sunttivirta-anturi on kiskoon liitettävä 12  $\mu\Omega$  sunttivastus, jossa on valmiiksi liitetty mittauselektronikkapiiri, joka muuntaa suntin analogisen mittaussignaalin  $\Delta\Sigma$ -moduloiduksi digitaalseksi signaaliksi. Suntin nimellinen mittausalue on 1000 A<sub>RMS</sub> ja suntin alkuperäisen elektronikan käyttöjännite on +5 V. Mittauspiirissä on galvaanisesti erottava  $\Delta\Sigma$ -modulaattori ja galvaanisesti erottava jänniteregulaattori. Sunttivistukseen on lisäksi kiinnitetty erään valmistajan prototyyppielektronikka. Myös tässä mittauspiirissä on galvaanisesti erottava  $\Delta\Sigma$ -modulaattori, mutta sen jänniteregulaattorit eivät ole erottavia. Koska käyttöjännitteen erotus pääpiirikiskosta puuttuu, ja koska tämän elektronikan käyttöjännite on bipolaarinen -8 V ja +15 V voidaan olettaa, että käyttöjännite on tarkoitettu syötettäväksi IGBT-moduulien hilaohjauksien käyttöjännitteistä. Suntista ja sen elektronikkapiireistä ei ole saatavilla datalehtitietoja, sillä molemmat ovat prototyypin näytekalpeita.

Prototyypielektroniikan liitos sunttiin nähdään kuvasta 37. On selvää, että tämä piirikortti on melko nopeasti suunniteltu ja valmistettu prototyyppi, sillä esimerkiksi liitos sunttivastukseen on toteutettu kahdella pultilla ja mutterilla. Sen sijaan suntin alkuperäinen elektroniikka on juotettu suoraan suntin terminaleihin. Pulttiliitos ei ole optimaalinen, sillä se muodostaa suhteellisen suuren silmukan hyvin lähelle suurvirtaista kiskoa. Lisäksi pultit ja mutterit saattavat olla myös termojännitteiden suhteen huonoja ratkaisuja.



Kuva 37: Prototyypielektroniikan liitos sunttiin

Kuvassa 38 on esitetty suntin dataväylät ja käyttöjännitesyötöt. Alkuperäinen elektroniikka on liitetty neljällä johtimella bufferin välityksellä FPGA-korttiin. Bufferi sovittaa alkuperäisen elektroniikan kello- ja  $\Delta\Sigma$ -signaalin FPGA:n vastaaviin signaaleihin. Alkuperäisen elektroniikan digitaalisignaalit eivät ole differentiaalisia. Sen sijaan prototyypielektroniikan kello- ja datasignaali ovat LVDS-signaaleja (low-voltage differential signaling), joten näiden pitäisi olla häiriösietoisempia alkuperäisen elektroniikan dataväylään verrattuna. Kumpikin mittauselektroniikka käyttää 20 MHz:n kellosignaalia.



Kuva 38: Suntin dataväylät

Suntin vertailukohteena on LEM HAH1DR 900-S, joka on kompensoimaton Hall-anturi. Anturi on esitetty kuvassa 39. Hall-anturin mittaussignaali eroaa merkittävästi suntin mittaussignaalista, sillä se on analoginen. Anturiin liitetään kolme johdinta: käyttöjännite, maapotentiaali ja mittaussignaali. Tässä anturissa ei ole lämpötilamittausta, joten se ei ole lämpötilakompensoitu. Oleellisia Hall-anturin datalehden tietoja [24]:

- Mittausalue  $\pm 900$  A ( $636 A_{RMS}$ ).
- Käyttölämpötila-alue  $-40$  °C -  $125$  °C.
- Kaistanleveys 30 kHz.
- Sähköinen nollapistepoikkeama  $\pm 2,5$  A ( $25$  °C).
- Magneettinen nollapistepoikkeama  $\pm 1,2$  A ( $25$  °C).
- Lineaarisuusvirhe  $\pm 2$  % ( $25$  °C).
- Vasteaika 5 - 8  $\mu$ s ( $di/dt = 100$  A/ $\mu$ s).
- Unipolaarinen käyttöjännite +5 V.
- Herkkyys 2,22 mV/A.

Mittaussignaalin  $u_M$  lisäksi myös käyttöjännite  $U_S$  on mitattava, sillä se vaikuttaa analogisen mittaussignaalin arvoon. Hall-anturin virta-arvo on laskennallisesti

$$i_M = \frac{5 \text{ V}}{2,22 \cdot 10^{-3} \text{ V/A}} \left( \frac{u_M}{U_S} - 0,5 \right), \quad (27)$$

jossa  $u_M$  on Hall-anturin ulostulojännite [24].



Kuva 39: Tutkittava LEM HAH1DR 900-S

Hall-anturin datalehden arvoista havaitaan, että mittausalue on riittämätön ja kaistanleveys on tasan minimivaatimuksen mukainen. 30 kHz:n kaistanleveydellä voidaan mitata riittävän hyvin säädön vaatimalla kaistanleveydellä perusaaltoa. Dynaamisissa tilanteissa kaistanleveys saattaa riittää, mutta kuten luvussa 4.1 kerrottiin, tämä kaistanleveys ei riitä suuritaajuiselle värähtelylle. Tässä työssä tutkitaan vain yhdellä Hall-anturilla toteutettua virranmittausta, mutta on selvää, että vaaditulle virta-alueelle tarvitaan kahden anturin rinnankytkentä. Muut datalehden arvot vaikuttavat riittävältä. Käyttöjännite vaikuttaa mittaussignaalin arvoon yhtälön (27) mukaisesti, koska käyttöjännite määrää suoraan Hall-elementin ohjausvirran suuruuden. Tästä syystä tehoelektroniikan ohjauselektroniikan on mitattava myös Hall-anturien käyttöjännite.

Kun tässä luvussa esiteltyjä virta-antureita vertaillaan, on huomioitavia kaksi asiaa. Hall-anturi on uusi komponentti, mutta suntti on noin kaksi vuotta vanha. Lisäksi suntilla on tehty muita testejä ennen tätä diplomityötä. Toisin sanoen se on ollut käytössä. Tämän työn kannalta on hyvä, että nähdään suntin suorituskyky lyhytaikaisen käytön jälkeen, mutta Hall-anturin laatua käytön jälkeen ei voida todeta. Lisäksi on huomioitava se, että Hall-anturi on kaupallinen tuote, kun taas suntti ja sen molemmat elektroniikkapiirit ovat vasta varhaisia prototyypppejä.

## 5 Mittaukset

Luvussa 4.2 esitettyjä virta-antureita tutkittiin mittaamalla staattista ja dynaamista suorituskkyä. Staattisen suorituskvyn mittauksia ovat nollapistepoikkeama lämpötilan funktiona, suntin terminaalien epätasaisen lämpenemän aiheuttama nollapistepoikkeama ja lineaarisuus- ja vahvistusvirhe kolmessa eri lämpötilassa. Luvuissa 5.1 ja 5.2 esitetään staattisen ja dynaamisen suorituskvyn mittausjärjestelyt. Vastaavasti luvuissa 5.4 ja 5.5 esitetään staattisen ja dynaamisen suorituskvyn tulokset. Luvussa 5.3 esitetään yleisiä havaintoja kaikista mittauksista. Luvussa 5.6 on yhteenveto mittaus-tuloksista. Mittauksissa käytetyt mittalaitteet on esitetty liitteessä A.

### 5.1 Staattisen suorituskvyn mittausjärjestelyt

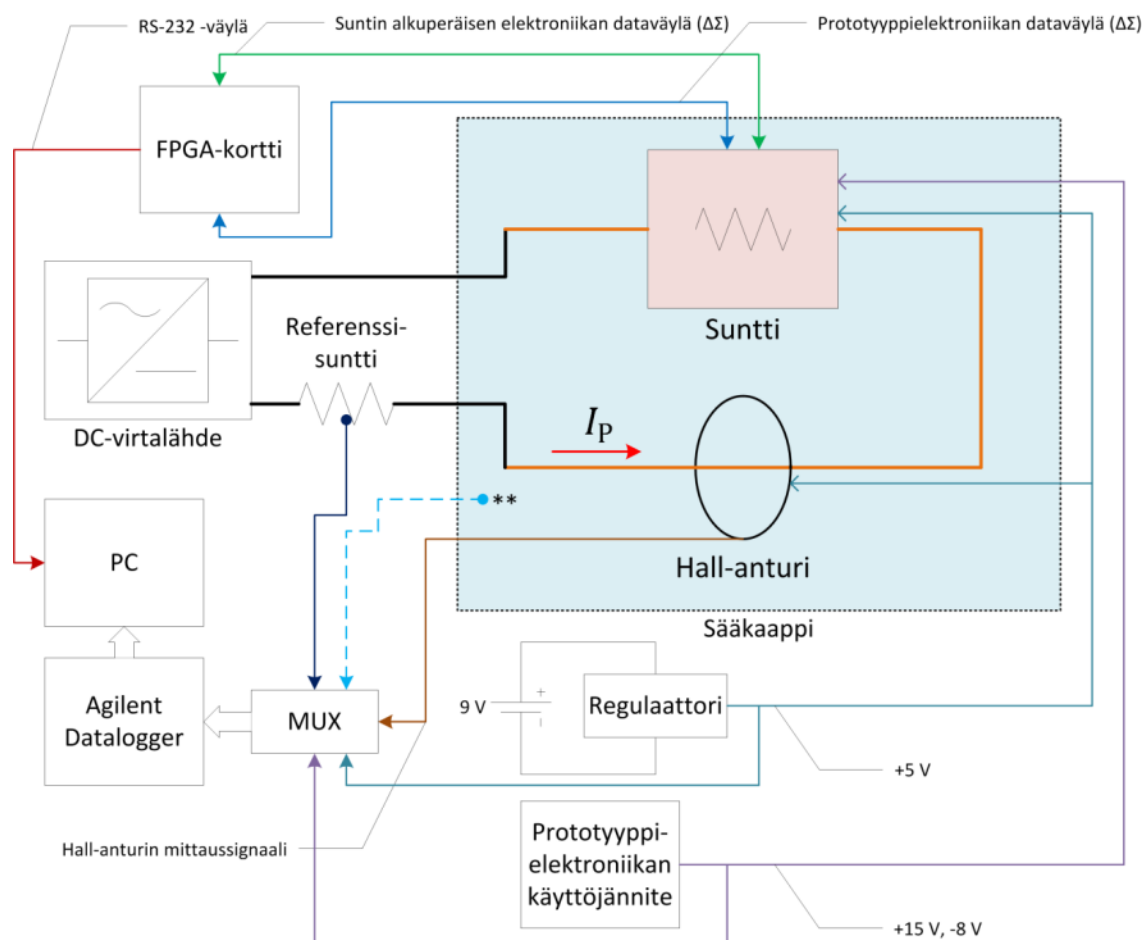
Staattista suorituskkyä tutkitaan mittaamalla tutkittavien anturien nollapistevirheen lämpötilariippuvuutta ja lineaarisuus- ja vahvistusvirhettä kolmessa eri lämpötilassa. Lisäksi suntin terminaalien epätasaista lämpenemistä tutkitaan. Nollapistepoikkeama määritetään anturin lämpötilan funktiona koko lämpötila-alueelle ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Lineaarisuus- ja vahvistusvirhe tutkitaan sekä nimellislämpötilassa ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) että maksimi- ja minilämpötiloissa. Mittauksissa, joissa käytetään virtaa, ympäristö on lämmitetty tarvittavaan lämpötilaan, jotta anturin lämpötila on haluttu. Ympäristön lämpötila ei siis ole datalehtien arvojen mukainen, mutta virta kulkee anturien läpi niin lyhyen aikaa, että maksimilämpötilassa anturin käyttölämpötilan ei pitäisi ylittyä.

Kuvassa 40 on esitetty staattisen suorituskvyn mittausjärjestely. Tutkittava suntti ja Hall-anturi on asennettu U-kiskoon (oranssi osa kuvassa 40) niin, että virtalähteellä syötetty tasavirta  $I_p$  kulkee molempien anturien läpi. Kisko antureineen on sääkaapissa, jonka lämpötilaa voidaan hallita. Kaapin kosteudenhallinta ei ole käytössä. Kiskosto on kytketty kaapeleilla (musta osa kuvassa 40) kaapin ulkopuolella olevaan virtalähteeseen, jolla järjestelmään voidaan syöttää 1200 A tasavirtaa. Virtalähteen jälkeen sen yläjännitepuolelle on virtakaapelin kanssa kytketty sarjaan tarkka suntti referenssimittauksista varten. Suntin kummankin mittauselektronikan  $\Delta\Sigma$ -moduloidut mittaus-signaalit tuodaan FPGA-kortille (Digilent Spartan 3), joka tekee digitaalisen suodatuksen ja harvennuksen. Käsitellyt signaalit viedään kahdeksan tavun sarjoissa RS-232 -väylää pitkin PC:lle. Kumpikin mittaussignaali on 16-bittinen, joten molemmat tarvitsevat kaksi tavua. Hall-anturin mittaussignaali on analoginen, joten se viedään jännitetietona multiplekserin (MUX) kautta tiedonkeruulaitteelle, josta edelleen PC:lle. Myös referenssisuntin signaali on analoginen, joten vastaavasti se viedään multiplekserin ja tiedonkeruulaitteen kautta PC:lle.

Prototyypimittauselektronikka käyttää bipolaarista käyttöjännitettä, jossa positiivinen jännite on  $+15\text{ V}$  ja negatiivinen jännite on  $-8\text{ V}$ . Hall-anturi ja suntin alkuperäinen elektronikka käyttävät unipolaarista  $+5\text{ V}$  -käyttöjännitettä. Viiden voltin jännite

tehdään yhdeksän voltin pariston jännitteestä lineaariregulaattorilla. Bipolaarinen käyttöjännite tehdään laboratoriojännitelähteellä. Kaikki käyttöjännitteet mitataan, jotta voidaan varmistua siitä, että ne ovat nimellisessä arvossa. Lisäksi Hall-anturin mittaus-signaalin jännitetaso on verrannollinen sen käyttöjännitteeseen, joten käyttöjännite on oleellinen tieto myös virta-arvon laskemisessa.

Kuvassa 40 sinisellä katkoviivalla esitetty signaali kuvaa lämpötilojen mittausta. Selkeyden vuoksi mittauspisteitä ei ole esitetty kuvassa 40, vaan lämpötilamittaus kuvataan vain kahdella tähdellä (\*\*). Mittauspisteet nähdään kuvasta 41. Lämpöantureina käytetään J-tyyppin termoelementtilankaa. Lämpöanturit on myös kytketty multiplekserin välityksellä tiedonkeruulaitteelle.

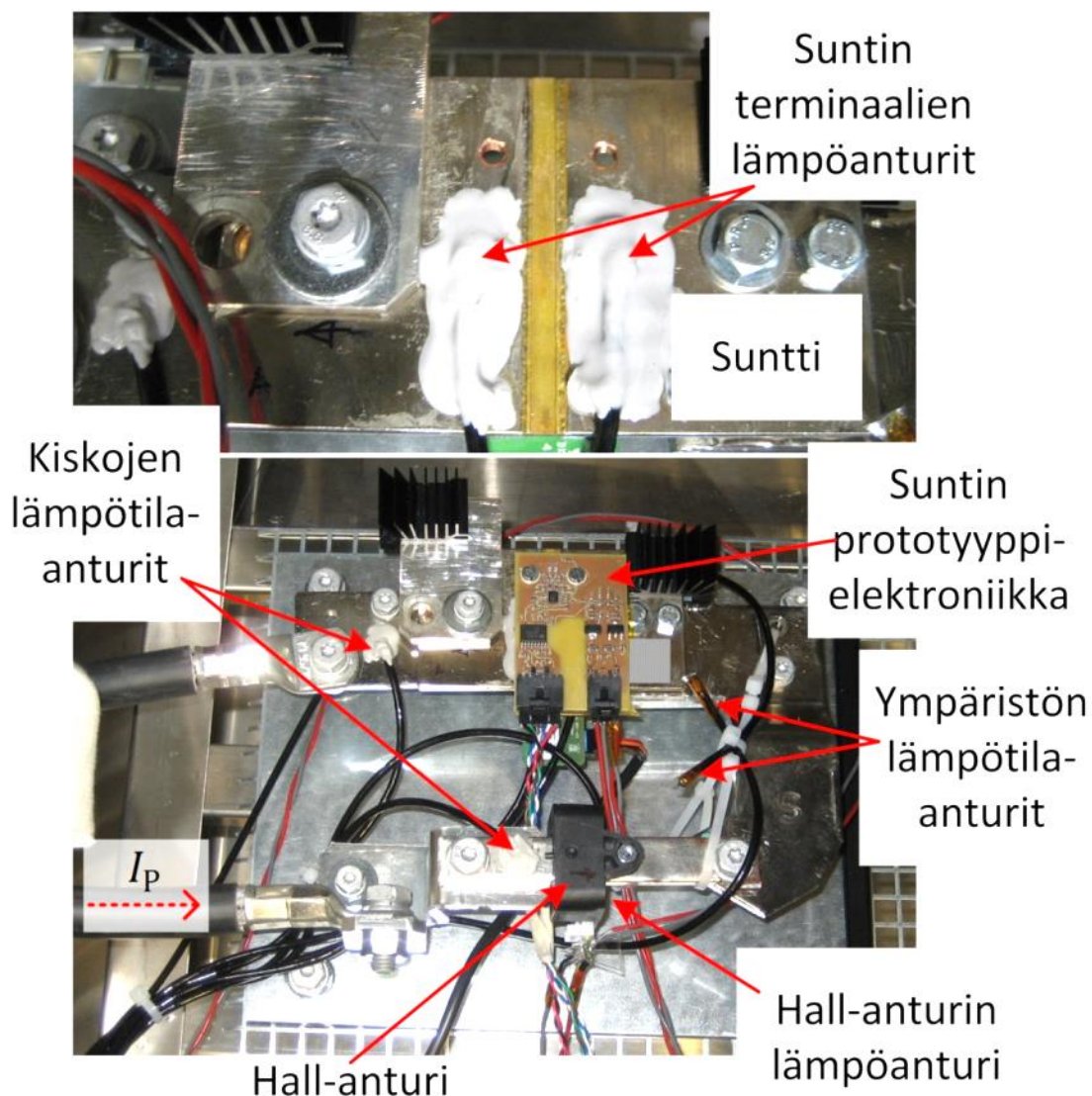


Kuva 40: Staattisen suorituskyvyn mittausjärjestely

Kuvassa 41 on esitetty sääkaapin sisällä oleva kiskosto. Kuvan yläosassa on testattava suntti ilman prototyypielektroniikkaa. Suntin kumpaankin terminaaliiin on asennettu termoelementti mahdollisimman lähelle resistiivistä materiaalia. Suntin oma mittaus-elektroniikka on suntin kääntöpuolella. Kuvan 41 alaosassa prototyypielektroniikka on asennettu sunttiin. Varsinkin suurilla testivirroilla ( $\geq 500 A_{DC}$ ) kiskoston ja anturien lämpötilaa on vaikeaa hallita. Tämän vuoksi sunttiin on kiinnitetty kaksi pientä lämmönvaihdinta, jotka pyrkivät estämään suuret terminaalien väliset lämpötilaerot.



Kiskosto on lisäksi asennettu sääkaappiin niin, että kaapin ilmakierto kulkisi mahdollisimman hyvin kiskojen, anturien ja lämmönvaihtimien kautta. Kuitenkin yli tuhannen ampeerin virroilla suntin terminaalien välinen lämpötila nousee hyvin nopeasti.



Kuva 41: Testattavien anturien kiskosto

Kiskostoon lisättiin epätasaisen lämpenemän mittauksia varten kaksi sarjaan kytkettyä Peltier-elementtiä. Nämä eivät näy kuvassa 41. Asennuspaikka on joko suntin vasemmalla tai oikealla puolella riippuen siitä, kumpaa terminaalia haluttiin lämmittää. Asennuspaikka on mahdollisimman lähellä sunttia. Myös tässä tapauksessa lämmönvaihtimilla oli merkitystä varsinkin siinä kiskon kohdassa, jota ei lämmitetty.

Kaikissa staattisissa mittauksissa tallennettiin tarvittava määrä jännite- ja lämpötilamittaustietoa Agilent BenchLink Data Logger 3 -ohjelmalla. Jos virtaa mitattiin referenssisuntilla, tallennettiin myös tämä mittaustieto edellä mainitulla ohjelmalla. Samalla RS-232 -väylän dataa tallennettiin käyttämällä RealTerm-ohjelmaa. Tämä data tallentui heksadesimaalijonoina, jotka ovat kahdeksan tavun ryhmissä. Raakadata

muutettiin Excelillä virtatiedoksi. Raakadatalla tarkoitetaan FPGA:lla suodatettua ja harvennettua signaalia. Sitä ei siis pidä sekoittaa suntin  $\Delta\Sigma$ -signaalin. FPGA-kortissa on myös DA-muunnin, jota hyödyntämällä sunttien mittaussignaali olisi voitu synkronoida helposti muun mittaustiedon kanssa. Ongelmana oli kuitenkin se, että DA-muuntimen referenssijännitteen toleranssi on  $\pm 5\%$ . Näin ollen ainoa tapa tehdä tarkkuusmittaus oli tallentaa DA-muuntimelle menevää raakadataa.

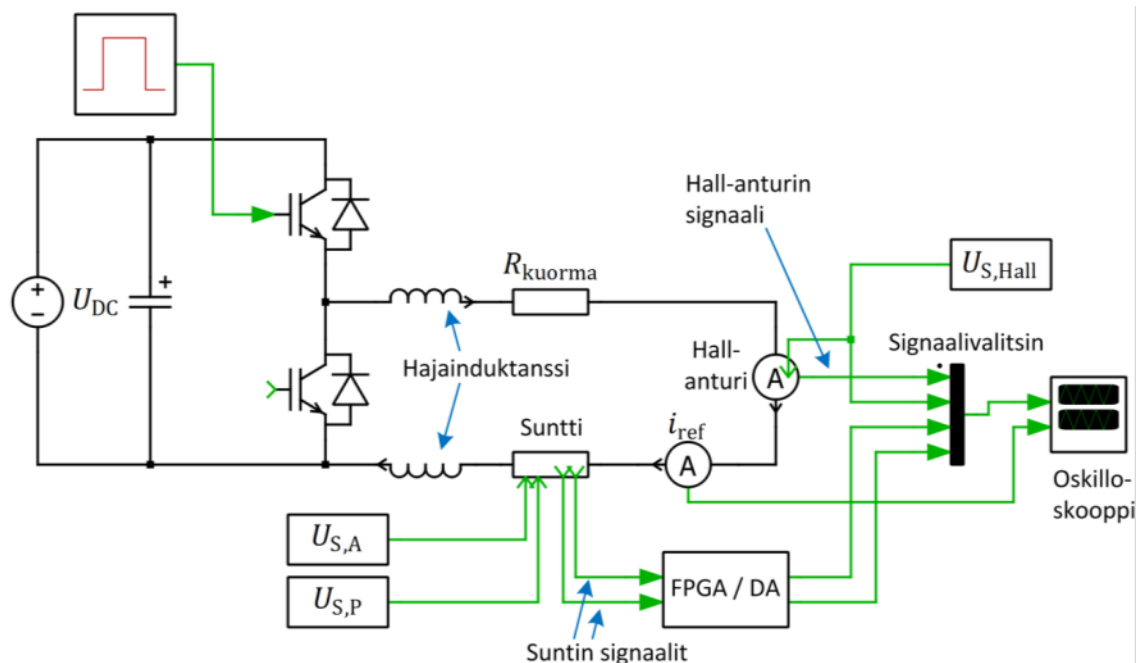
Raakadata on 16-bittistä bittivirtaa, joka tallennetaan heksadesimaaliarvoina tiedostoon. Heksadesimaaliarvo 0000 tarkoittaa negatiivista maksimivirtaa ja FFFF vastaavasti positiivista maksimivirtaa. Nollavirtaa vastaa arvo 8000. FPGA:lle on suntin valmistajan elektroniikan mittausalueeksi ohjelmoitu  $\pm 6324$  A, jolloin mittausrésoluutio on 193 mA / LSB. Prototyypielektroniikan mittausalue on  $\pm 1776$  A, joten sen résoluutio on 54,2 mA / LSB. Datan baudinopeus on 9600, jolla virrasta saadaan noin sata näytettä sekunnissa. Tämä on riittävä nopeus tasasähkömittauksiin.

Nollapistepoikkeamaa tutkittiin eri lämpötiloissa. Sääkaapilla säädettiin Hall-anturin pintalämpötila ja suntin terminaalien lämpötilat haluttuun lämpöön. Mittaukset tehtiin  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilan lisäksi kymmenen asteen välein  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ :sta  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een. Näitä mittauksia tehtiin yhteensä kolme erillistä mittaussarjaa, sillä myös virran vaikutusta anturien nollapistepoikkeaman stabiiliuteen tutkittiin. Ensimmäinen mittaus tehtiin käyttämättömillä antureilla. Seuraavat tehtiin positiivisen ja negatiivisen maksimivirran ( $\pm 1200$  A) jälkeen. Suntin terminaalien epätasaisen lämpenemän mittaukset tehtiin vain noin  $25 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Epälineaarisuutta ja vahvistusvirhettä tutkittiin käyttämällä tasavirtaa.  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa mittauspisteet olivat  $-1200$  ampeerista  $1200$  ampeeriin  $50$  ampeerin välein. Minimi- ja maksimilämpötiloissa ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mittauspisteet olivat  $100$  ampeerin välein.

## 5.2 Dynaamisen suorituskyvyn mittaussjärjestelyt

Dynaamista suorituskykyä tutkittiin kuvan 42 mittaussjärjestelyllä. Virtapulssilähteenä käytettiin erästä vaihtosuuntaajamoduulia, jonka moottorisäätö on ohitettu PC:llä muokattavalla makrolla. Tässä tapauksessa vaihtosuuntaajaa käytettiin niin, että C-vaiheen ylähaaran IGBT:lle annettiin yksi hilapulssi, jonka kestoaikaa voitiin säätää  $50$  ns askelissa. Alahaaran IGBT pidettiin koko ajan johtamattomana. Tutkittavat anturit oli asennettu kiskostoon, joka oli kytketty kaapeleilla vaihtosuuntaajan C-vaiheen lähtökiskon ja  $U_{DC}$ -kiskon väliin. Näin antureille saatiin virtapulssi, jonka amplitudi voitiin asettaa kuormavastuksen  $R_{kuorma}$  valinnalla ja välipiirijännitettä säätämällä  $520$  ja  $800$  voltin välillä. Virtapulssin nousuaikaa ei voitu säätää, joten virran nousuaika oli mittauksissa suunnilleen vakio. Kaapelit valittiin niin, että niissä on riittävästi hajainduktanssia rajoittamaan virran nousunopeutta.





Kuva 42: Dynaamisen suorituskyvyn mittausjärjestely

Virta-antureille kytkettiin käyttöjännitteet kuten staattisissa mittauksissakin. Nyt kuitenkin Hall-anturin ja suntin alkuperäisen elektronikan käyttöjännitteet tehtiin eri regulaattoreilla, jotta käyttöjännitteen maasilmukka voitiin välttää. Hall-anturin käyttöjännite mitattiin, koska se vaikuttaa suoraan Hall-anturin ulostulosignaaliin. Suntin mittauselektronikkapiirien käyttöjännitteitä ei mitattu varsinaisissa mittauksissa, mutta niiden stabiilius virtapulssin aikana varmistettiin erillisellä mittauksella.

Suntin signaalit kytkettiin tässäkin tapauksessa FPGA-kortille. Nyt ei kuitenkaan voitu käyttää digitaalisen signaalin lukemista suoraan PC:lle, koska 100 näytettä sekunnissa ei riitä tutkittavien ilmiöiden aikavakioille. Dynaamisissa mittauksissa käytettiin FPGA-kortin DA-muunninta, jolla saatiin analoginen signaali suoraan oskilloskoopille (Rohde & Schwarz RTO 1014). DA-muuntimen jännitelähdön resoluutio on alkuperäisen elektronikan signaalille 772 mA / LSB ja prototyyppielektronikan signaalille 866 mA / LSB. DA-muuntimen referenssijännitteen toleranssi on  $\pm 5\%$ , kuten jo edellisessä luvussa mainittiin.

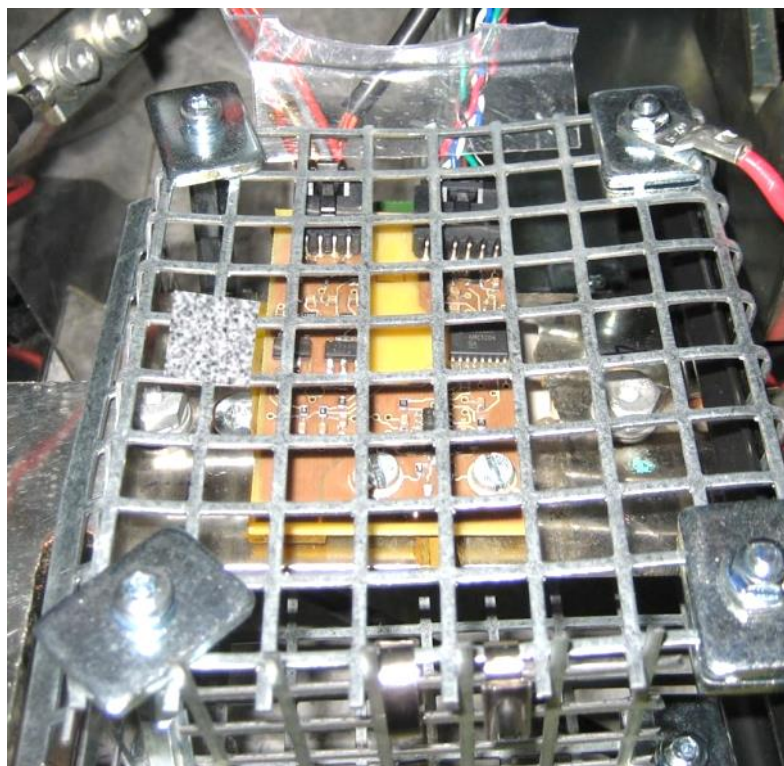
Kuvan 42 signaalivalitsin ei ole todellinen osa mittausjärjestelyä. Se kuvaa vain sitä, että jokainen signaali mitattiin aina erikseen, sillä näissä mittauksissa käytettiin suoria jännitemittapäitä. Mittaukset tehtiin erikseen, jotta välttyttiin maasilmukkaan induoituilta häiriöiltä. Oskilloskoopin kanavat eivät ole erottavia. Ainoastaan referenssivirtamittaus voitiin pitää aina oskilloskoopissa kiinni, sillä referenssimittauksessa käytettiin PEM CWT 15R -Rogowski-käämiä. Referenssimittausta käytettiin myös oskilloskoopin mittauksen liipaisuun.

Mittaus tehtiin aina tietyssä järjestyksessä niin, että jokaisessa mittauksessa käytettiin samanlaista virtapulssia. Toisin sanoen pulssin kesto, kuormavastus ja välipiirijännite

pidettiin samoina. Jokaisen mittauksen jälkeen oskilloskooppiin kytketty mittaus vaihdettiin toiseen. Hall-anturin jännitteet mitattiin 500 MHz:n Testec TT-HF 512 -mittapäillä, joiden vaimennus on 10:1. DA-muuntimen signaalit kytkettiin aina suoraan oskilloskoopille. Mittausjärjestys oli:

1. Hall-anturin käyttöjännite.
2. Hall-anturin signaali.
3. Alkuperäinen sunttielektroniikka.
4. Suntin prototyypielektroniikka.

Kuvissa 43 ja 44 on esitetty virta-anturien kytkennät ja niiden Faradayn häkit, jotka vaimentavat sähkökentän muutosten vaikutuksia.



Kuva 43: Suntti dynaamisen mittauksen kiskostossa



Kuva 44: Hall-anturin dynaaminen mittaus

### 5.3 Yleisiä havaintoja mittaustuloksista

Mittaustuloksista havaittiin, että Hall-anturin suorituskkyky on odotettua parempi. Yllättävä havainto oli se, että suntin alkuperäinen elektronikka suoriutui joissakin mittauksissa paremmin kuin prototyyppielektronikka, mutta joissakin testeissä se suoriutui huonommin. Suntielektronikkojen välillä ei siis havaittu selkeästi parempaa mittauselektronikkaa, vaan eri ominaisuuksia tutkiessa paremmuus vaihteli.

Staattisissa mittauksissa havaittiin, että prototyyppielektronikan mittausdatassa on näytteiden välillä suurempi keskihajonta kuin alkuperäisen elektronikan mittausdatassa. Lisäksi molemmissa tapauksissa mittausdatan keskihajonta kasvoi lämpötilan noustessa. Esimerkiksi nollapistepoikkeamamittauksissa (positiivisen virran jälkeen) keskihajonnat ovat seuraavat:

- $-40\text{ °C}$ : alkuperäinen elektronikka 0,81 A ja prototyyppielektronikka 1,41 A,
- $25\text{ °C}$ : alkuperäinen elektronikka 1,04 A ja prototyyppielektronikka 1,56 A,
- $105\text{ °C}$ : alkuperäinen elektronikka 1,27 A ja prototyyppielektronikka 1,78 A.

Keskihajonnan kasvu lämpötilan noustessa johtuu oletettavasti  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin suorituskkyvyn heikkenemisestä lämpötilan kasvaessa. Tämä johtuu luultavasti modulaattorissa olevan komparaattorin tai takaisinkytkennän DA-muuntimen hidastumisesta.

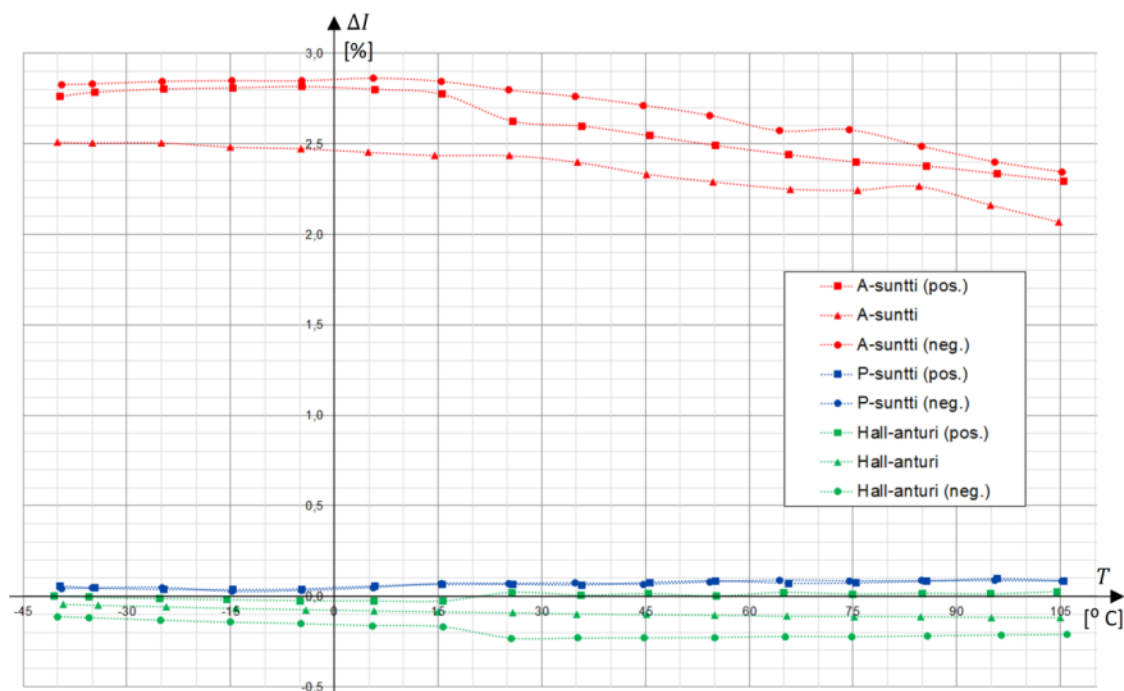
### 5.4 Staattisen suorituskkyvyn mittaustulokset

Tässä luvussa on esitetty staattisen suorituskkyvyn mittaustulokset. Tehdyt mittaukset ovat nollapistepoikkeama käyttölämpötilan funktiona, lineaarisuus- ja vahvistusvirhe ja suntin terminaalien epätasaisen lämpenemän aiheuttama nollapistepoikkeama.

#### 5.4.1 Nollapistepoikkeama käyttölämpötilan funktiona

Nollapistepoikkeamaa tutkittiin kolmessa eri tilanteessa. Ensimmäinen mittaus tehtiin, kun mittausjärjestelystä ei vielä ollut ajettu virtaa. Seuraavat mittaukset tehtiin  $+1200\text{ A}$  ja  $-1200\text{ A}$  virtojen jälkeen. Tällä menetelmällä pyrittiin tuomaan esille Hall-anturin remanenssivuon aiheuttama nollapistepoikkeama suuren virran jälkeen. Prototyyppielektronikkaa varten ei vielä ollut johtosarjoja ensimmäisessä mittausvaiheessa, joten se ei ollut ensimmäisessä mittauksessa mukana (elektronikka oli kuitenkin asennettu sunttiin). Mittaustulokset on esitetty kuvassa 45. Suntin kiskot ja Hall-anturin lämpötilat pyrittiin tasaamaan lähelle mittauslämpötilapistettä. Toisin sanoen esimerkiksi  $25\text{ °C}$  mittauksessa lämpötila pyrittiin pitämään alueella  $25\pm1\text{ °C}$ . Lisäksi suntin kiskojen lämpötilaero pyrittiin tasaamaan ennen mittausta. Tämä ei kuitenkaan ollut aina mahdollista, sillä kiskoihin kytketyt kaapelit pyrkivät jäädyttämään kuumia kiskoja ja lämmittämään kylmiä kiskoja. Lämpötilaero on pahimmillaan noin  $1,1\text{ °C}$ , kun

sääkaapin lämpötila on noin  $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Yhden asteen lämpötilaero ei tuo suurta virhettä mittaustuloksiin, kuten luvussa 5.4.3 osoitetaan (kts. kuva 48 sivulla 64).



Kuva 45: Suhteellinen nollapistevirhe lämpötilan funktiona. A-suntti on suntti alkuperäisellä elektronikalla ja P-suntti tarkoittaa prototyypielektroniikka. (pos.) tarkoittaa sitä, että ennen mittausta anturin läpi on mennyt  $+1200\text{ A}$  virta, ja (neg.) tarkoittaa vastaavasti  $-1200\text{ A}$  virtaa.

Kuvan 45 ja taulukon 3 tulokset ovat 20 sekunnin ajan tallennetun mittausdatan keskiarvoja. Suntin datanopeus on noin sata näytettä sekunnissa. Tiedonkeruulaitteen näytteistysväli on 1,6 s.

Kuten kuvasta 45 havaitaan, prototyypielektroniikka on hyvin stabiili lämpötilan suhteen, minkä lisäksi nollapistepoikkeama on koko lämpötila-alueella hyvin pieni. Myös Hall-anturin nollapistepoikkeama on pieni, mutta se on hieman enemmän riippuvainen lämpötilasta. Suntin alkuperäisen elektronikan nollapistepoikkeama on hyvin suuri. Lisäksi se muuttuu suhteellisen paljon varsinkin lämpötilan noustessa nimellisestä lämpötilasta. Taulukossa 3 on kootusti esitetty mitatut nollapistepoikkeamat eri tilanteissa lämpötiloissa  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Taulukko 3: Nollapistepoikkeamat nimellisessä lämpötilassa ja ääriämpötiloissa

	Anturin näyttämä [A]		
	Alkuperäinen elektroniikka	Prototyyppi-elektroniikka	Hall-anturi
−40 °C, +I <sub>P</sub>	27,6	0,57	0,01
−40 °C, 1. mittausta	25,1	ei mittausta	−0,40
−40 °C, −I <sub>P</sub>	28,3	0,43	−1,02
25 °C, +I <sub>P</sub>	26,3	0,66	0,20
25 °C, 1. mittausta	24,4	ei mittausta	−0,83
25 °C, −I <sub>P</sub>	28,0	0,71	−2,08
105 °C, +I <sub>P</sub>	23,0	0,86	0,24
105 °C, 1. mittausta	20,7	ei mittausta	−1,07
105 °C, −I <sub>P</sub>	23,5	0,85	−1,91

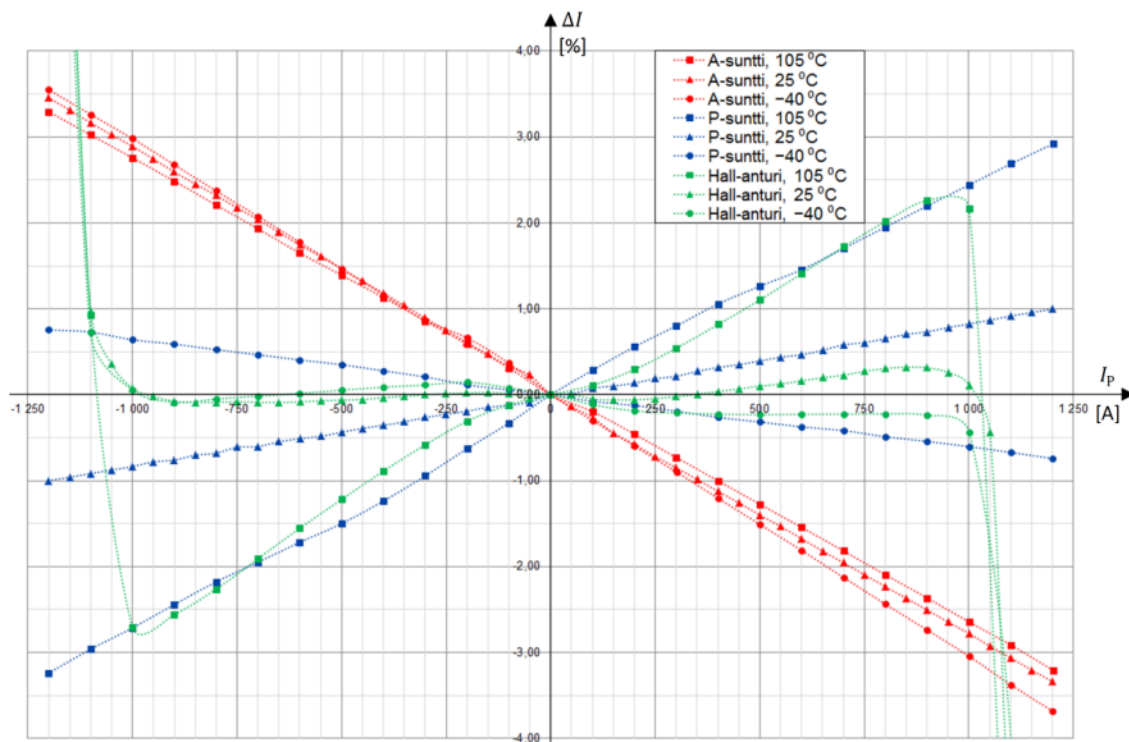
Lämpötila on mitattu J-tyypin termoparilla, joten lämpötilamittauksen virhe on  $\pm 1,0$  °C. Hall-anturin signaalin ja käyttöjännitteen virheet ovat 0,0041 %. Suntin käyttöjännitteiden valvontamittauksen virhe on 0,0041 % alkuperäiselle elektroniikalle ja prototyyppielektroniikan negatiiviselle käyttöjännitteelle. Prototyyppielektroniikan positiivisen käyttöjännitteen virhe on 0,0085 %.

#### 5.4.2 Lineaarisuus- ja vahvistusvirhe

Lineaarisuutta ja vahvistusvirhettä tutkittiin kolmessa eri lämpötilassa: −40 °C, 25 °C, ja 105 °C. Kuvassa 46 on esitetty suhteellinen mittausrvirhe todellisen virran funktiona. Suhteellinen mittausrvirhe on

$$\Delta I = \frac{I_M - I_P - I_{\text{offset}}}{\hat{I}_N} \cdot 100 \%, \quad (28)$$

jossa  $I_M$  on tutkittavalla anturilla mitattu virta,  $I_{\text{offset}}$  on ennen lineaarisuusmittausta tehdyn nollavirtamittauksen nollapistepoikkeama,  $I_P$  on referenssisuntilla mitattu virta ja  $\hat{I}_N$  on nimellisvirran huippuarvo. 25 °C lämpötilassa mittaukset tehtiin 50 A välein −1200 A:sta +1200 A:iin. −40 °C ja 105 °C lämpötiloissa mittaukset tehtiin 100 A välein. Kun lämpötila oli stabiloitunut haluttuun arvoon, syötettiin järjestelmään haluttua virtaa lyhyen aikaa. FPGA-kortilta luettavaa raakadataa tallennettiin kaksi sekuntia (noin 200 näytettä) ja tiedonkeruulaitteella tallennettiin viisi näytettä 1,6 sekunnin välein. Tiedon tallennusaika on lyhyt, koska varsinkin suurilla virroilla sunti kuumeni nopeasti. Lisäksi suntin terminaalien välinen lämpötilaero muuttui suurilla virroilla varsin nopeasti.



Kuva 46: Suhteellinen mittausrvirhe todellisen virran funktiona

Kuvassa 46 esitetyt käyrät sisältävät vahvistus- ja lineaarisuusvirheen. Ideaalitilanteessa kaikki käyrät olisivat  $I_P$ -akselin päällä. Hall-anturin mitatut virheet muuttuvat voimakkaasti  $I_P$ -akselin molemmissa päässä, sillä Hall-anturin mitta-alue ylittyy. Hall-anturin mitta-alueeksi on määritetty  $\pm 900$  A, mutta mitta-alue näyttää pysyvän melko lineaarisena  $\pm 950$  A saakka. Tässä on syytä huomata, että Hall-anturin maksimi-toimintalämpötila on  $125$  °C ja mittaus on tehty vain vaatimuksen mukaisessa  $105$  °C:een lämpötilassa. Taulukossa 4 on esitetty anturien vahvistusvirheet eri lämpötiloissa. Virrat  $I_{\min}$  ja  $I_{\max}$  ovat Hall-anturin mitta-alueen ääripäät, tai suntin tapauksessa virtalähteen maksimivirta  $\pm 1200$  A. Suntin vahvistusvirhettä ei siis ole kyetty määrittämään todellisessa nimellispisteessä, joka on

$$\hat{I}_{\text{suntti}} = \sqrt{2} I_{\text{suntti,RMS}} \approx 1414 \text{ A.} \quad (29)$$

Taulukko 4: Vahvistusvirheet nimellisessä lämpötilassa ja äärlämpötiloissa

	Vahvistusvirhe		
	Alkuperäinen elektronikka	Prototyyppi-elektronikka	Hall-anturi
$-40$ °C, $I_{\min}$	50,3 A / 3,55 %	10,7 A / 0,76 %	-0,78 A / -0,09 %
$-40$ °C, $I_{\max}$	-52,1 A / -3,68 %	-10,5 A / -0,74 %	-2,17 A / -0,24 %
$25$ °C, $I_{\min}$	48,9 A / 3,46 %	-14,1 A / -1,00	-0,68 A / -0,08 %
$25$ °C, $I_{\max}$	-47,2 A / -3,34 %	14,1 A / 1,00 %	2,82 A / 0,31 %
$105$ °C, $I_{\min}$	46,6 A / 3,30 %	-45,8 A / -3,24 %	-23,0 A / -2,56 %
$105$ °C, $I_{\max}$	-45,4 A / -3,21 %	41,3 A / 2,92 %	20,3 A / 2,26 %



Suntin alkuperäinen elektroniikka on vahvistusvirheen suhteen stabiilein, mutta sen vahvistusvirhe on toisaalta myös suurin. Prototyypielektroniikan vahvistusvirhe muuttuu lämpötilan muutoksen mukana voimakkaammin. Prototyypielektroniikalla ja Hall-anturilla on yhteistä se, että vahvistusvirheet muuttuvat  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een ja  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een mittauksissa melko vähän, mutta kun lämpötila nostetaan  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een, vahvistusvirhe muuttuu merkittävästi. Vahvistusvirheen muutokset  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een ja  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een välillä on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Vahvistusvirheen muutokset

	Muutos $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä [%yks.]		
	Alkuperäinen elektroniikka	Prototyyppi-elektroniikka	Hall-anturi
$I_{\min}$	-0,25	-4,00	-2,47
$I_{\max}$	0,47	3,66	2,50

Kuvassa 47 on esitetty lineaarisuusvirheet. Lineaarisuusvirheen laskentaa varten on vahvistusvirhe ja nollapistepoikkeama täytynyt kompensoida pois mittaustuloksista. Taulukon 4 tuloksista on jo kompensoitu nollapistepoikkeama. Vahvistusvirhetuloksien avulla voidaan määrittää suorat, jotka kulkevat origon kautta vahvistusvirheen määrittämiin pisteisiin. Lineaarisuusvirhe on poikkeama tästä suorasta. Suoran kulmakerroin määritetään erikseen negatiiviselle ja positiiviselle virralla. Kulmakerroin on

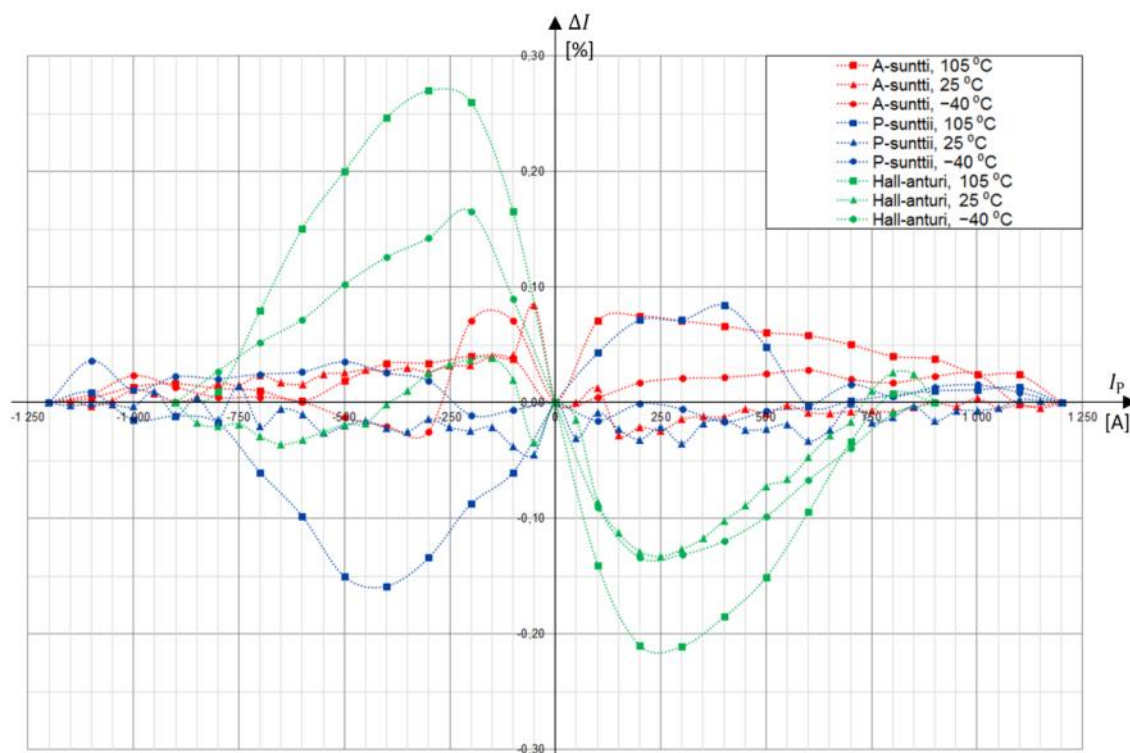
$$G_{\text{error}} = \frac{I_{M,N} - I_{\text{offset}}}{I_{P,N}}, \quad (30)$$

jossa  $I_{M,N}$  on anturin mittaama virta nimellisellä virralla  $I_{P,N}$ . Kulmakertoimen  $G_{\text{error}}$  avulla voidaan määrittää referenssisuorat lineaarisuusmittauksille. Esimerkiksi suntin alkuperäisen elektroniikan sovitussuora  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa on

$$\begin{cases} I_{\text{ref,ge}}(I_P) = 0,961 \cdot I_P ; I_P < 0 \\ I_{\text{ref,ge}}(I_P) = 0,962 \cdot I_P ; I_P \geq 0 \end{cases} \quad (31)$$

Lineaarisuusvirhe todellisen virran funktiona on

$$\Delta I(I_P) = \frac{I_{\text{ref,ge}}(I_P) - I_M - I_{\text{offset}}}{\hat{I}_N} \cdot 100 \% . \quad (32)$$



Kuva 47: Lineaarisuusvirhe virran funktiona

Kuvasta 47 havaitaan, että Hall-anturi on selvästi epälineaarinen, mikä oli ennalta odotettavissa. Lisäksi sen lineaarisuusvirhe on suurimmillaan noin kolmanneksella nimellisvirrasta. Virhe muistuttaa kuvan 14a) ja 14d) yhdistelmää; virhe on integraalinen, mutta siinä on myös hystereesivirhettä mukana. Prototyyppielektroniikan lineaarisuusvirhe muuttuu korkeassa lämpötilassa suhteellisen paljon. Suntin alkuperäisen elektroniikan lineaarisuusvirhe on lämpötilan suhteen stabiilein.

Taulukko 6: Lineaarisuusvirheet

	Lineaarisuusvirhe		
	Alkuperäinen elektroniikka	Prototyyppi-elektroniikka	Hall-anturi
-40 °C	0,07 %	0,04 %	0,17 %
25 °C	0,08 %	0,01 %	0,04 %
105 °C	0,08 %	0,08 %	0,27 %

Lineaarisuusvirhe määritellään maksimipoiikkeamana referenssisuorasta. Lineaarisuusvirheet ovat hyvin pieniä, kuten taulukosta 6 ja kuvasta 47 havaitaan. Suurin lineaarisuusvirhe on Hall-anturilla 105 °C lämpötilassa. Suntti on molemmilla mittausspiireillä hyvin lineaarinen. Maksimivirhe on suurimmillaan 0,08 % kummassakin tapauksessa.

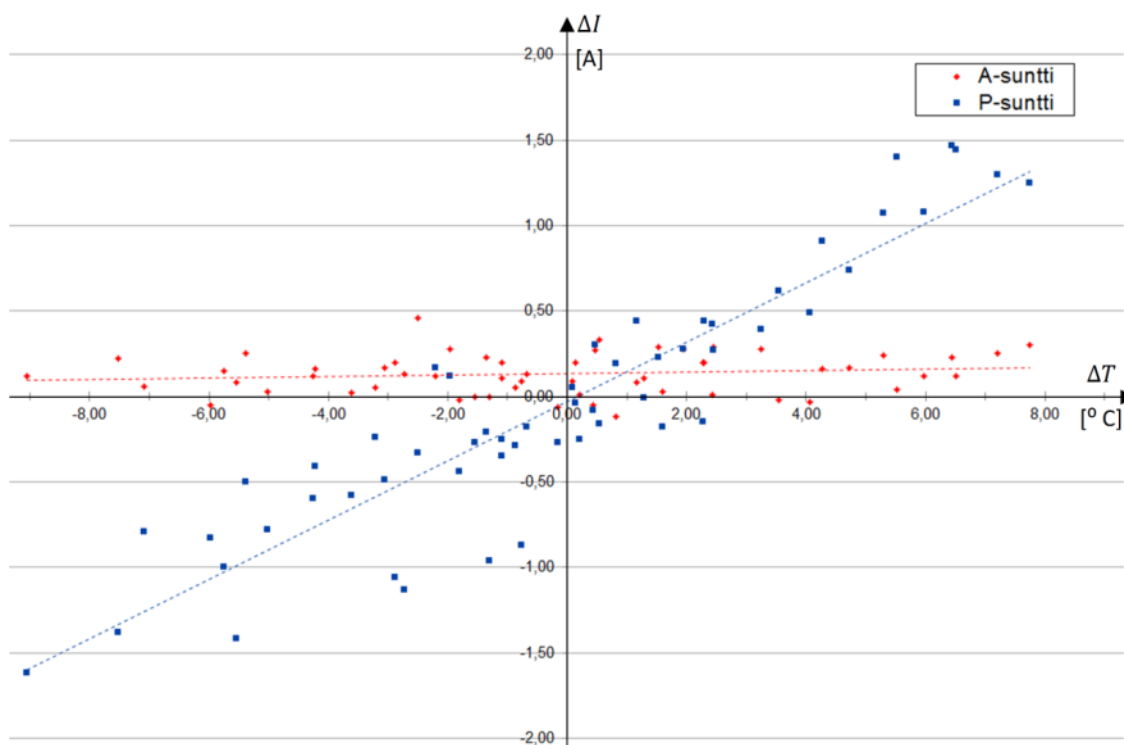
Lämpötila on mitattu J-typin termoparilla, joten lämpötilamittauksen virhe on  $\pm 1,0$  °C. Hall-anturin signaalin ja käyttöjännitteen virheet ovat 0,0041 %. Referenssisuntin



toleranssiksi on ilmoitettu  $< 0,5 \%$ . Referenssisuntin kalibrointitodistuksesta saadaan virheiksi 10 ampeerin virralla 2,5 mA ja 100 ampeerin virralla 12,5 mA.

### 5.4.3 Epätasaisen lämpenemän aiheuttama nollapistepoikkeama

Kuvassa 48 on esitetty suntin epätasaisen lämpenemän  $\Delta T$  aiheuttama virran nollapistepoikkeama  $\Delta I$ . Aluksi lämpötilaero asetettiin mahdollisimman lähelle nollaa noin  $25^\circ\text{C}$  asteen lämpötilassa. Näin saatiin nollapistepoikkeama ilman lämpötilaeroa, joka on suntin omalla elektronikalla 28,7 A ja prototyypielektronikalla 0,78 A. Peltier-elementtejä säädettiin niin, että lämpötilaero terminaalien välille muodostui, mutta samalla keskilämpötila pyrittiin pitämään alle  $30^\circ\text{C}$  lämpötilassa. Mittauksissa terminaalien keskilämpötila vaihteli välillä  $23,1^\circ\text{C}$  ja  $30,8^\circ\text{C}$ . Keskimäärin keskilämpötila oli  $26,1^\circ\text{C}$ . Mittaus tehtiin niin, että RealTerm-ohjelmalla tallennettiin dataa yhden sekunnin ajan. Samalla hetkellä mitatut lämpötilat kirjattiin ylös. Lämpötilatiedon päivitysnopeus on 1,6 s. Kuvassa 48 olevat pisteet ovat mittaustuloksia ja viivat ovat tuloksiin sovitetut suorat. Kummallakin elektronikalla tehtiin 28 mittausta sekä positiivisella että negatiivisella lämpötilaerolla.



Kuva 48: Suntin terminaalien epätasaisen lämpenemän aiheuttaman nollapistepoikkeama. Positiivinen lämpötilaero on suntin positiivisen virran ja positiivisen jännitehäviön suuntaan. Lämpötila on mitattu J-tyyppin termoparilla, joten lämpötilamittauksen virhe on  $\pm 1,0^\circ\text{C}$ .

Kuvasta 48 havaitaan, että prototyypielektronikan nollapistepoikkeama muuttuu selvästi, kun lämpötilaero terminaalien välillä muuttuu. Tämä tulos ei ole yllättävä, kun ottaa huomioon sivulla 49 kuvassa 37 esitetyn kiinnitysmekanismien. Kiinnityskohdassa

liitosrajapintoja on kaksi: suntti-mutteri ja mutteri-elektroniikka. Prototyypin elektroniikan tuloksista tehty sovitussuora kulkee lähes nolapisteen kautta. Mittaus-tuloksia on melko vähän, mutta sovitussuoran kulmakertoimesta voidaan tehdä karkea arvio virheen lämpötilaero-riippuvuudesta:

$$\Delta I \approx 0,17 \cdot \Delta T. \quad (33)$$

Suntin oman elektroniikan sovitussuora on melkein vaakasuora, joten suurikaan lämpötilaero terminaalien välillä ei näyttäisi aiheuttavan nolapistepoikkeamaa. Tuloksista nähdään kuitenkin se, että mittauspisteet ja sovitussuora ovat hieman nollan yläpuolella (0,13 A, kun  $\Delta T = 0$ ), vaikka referenssimittausten nolapistepoikkeama on kompensoitu tuloksista pois. Tästä nähdään jälleen jo aiemmin havaittu nolapistepoikkeaman satunnainen ajautuminen.

Mittauksissa havaittiin, että testikiskostolla ja -kaapeleilla, jotka eivät ole lähellekään 1200 ampeerin virtaa mitoitettuja, saatiin aikaiseksi melko helposti täydellä virralla noin kuuden asteen lämpötilaero suntin terminaalien välille. Lisäksi Peltier-elementtiä käyttäen saatiin aikaiseksi jopa yli kymmenen asteen lämpötilaero. On vaikeaa sanoa, mikä lämpötilaero oikeassa laitteessa on mahdollinen. Näissä mittauksissa suurin poikkeama on  $-1,62$  A lämpötilaerolla  $9,1$  °C. Virhe on  $0,162$  % nimellisestä virta-arvosta. Virhe ei ole siis kovin suuri. Ennakko-oletuksena oli se, että lämpötilaerolla olisi huomattavasti suurempi vaikutus.

#### 5.4.4 Staattisten virheiden vaikutus moottorisäätöön

Tarkastellaan edellä esitettyjen virheiden vaikutusta muutaman esimerkin avulla. Luvussa 3.7 käsiteltiin anturin epäideaalisuuksien vaikutuksia. Yhtälöllä (21) voidaan laskea nolapistepoikkeaman aiheuttama virhevektori  $\mathbf{i}_{s,oe}$  ja yhtälöllä (24) voidaan laskea vastaavasti vahvistusvirheen aiheuttama virhevektori  $\mathbf{i}_{s,ge}$ . Valitaan taulukoista 3 ja 4 jokaisen anturin suurin virhe. Lasketaan jokaiselle näistä virhevektorin kahteen eri tilanteeseen: kahden vaiheen (a ja b) virheet ovat samat ja kahden vaiheen virheet ovat vastakkaiset. Vahvistusvirhevektorit on laskettu 900 A virralla. Lasketut virhevektorit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7: Virhevektorit  $i_{s,oe}$  ja  $i_{s,ge}$  esimerkkitapauksissa

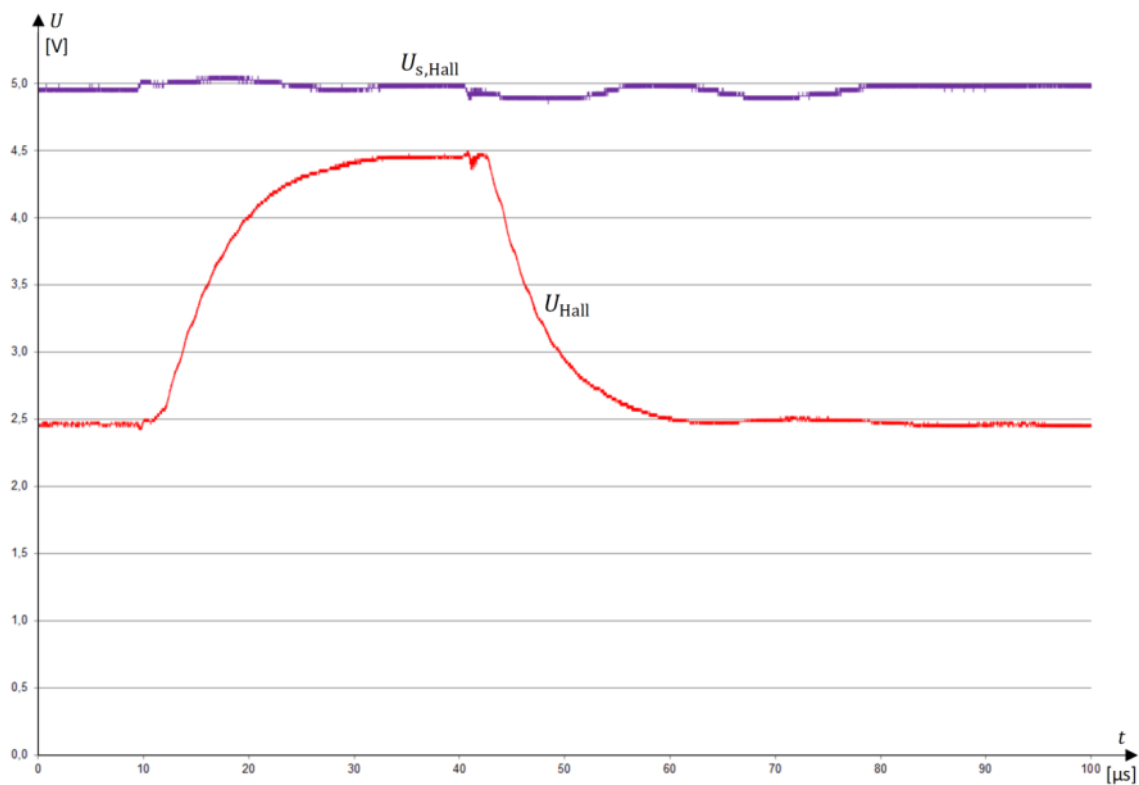
Nollapistepoikkeama	A-suntti ( $\Delta I = 28,3$ A)	P-suntti ( $\Delta I = 0,86$ A)	Hall-anturi ( $\Delta I = -2,08$ A)
$\begin{cases} i_{am} = i_a + \Delta I \\ i_{bm} = i_b + \Delta I \end{cases}$	$56,6 \angle 60^\circ$ A	$1,72 \angle 60^\circ$ A	$4,16 \angle -120^\circ$ A
$\begin{cases} i_{am} = i_a + \Delta I \\ i_{bm} = i_b - \Delta I \end{cases}$	$32,7 \angle -30^\circ$ A	$0,99 \angle -30^\circ$ A	$2,40 \angle 150^\circ$ A
Vahvistusvirhe ( $I_P = 900$ A)	A-suntti ( $G_e = -0,0368$ )	P-suntti ( $G_e = -0,0324$ )	Hall-anturi ( $G_e = -0,0256$ )
$\begin{cases} i_{am} = i_a(1 + G_e) \\ i_{bm} = i_b(1 + G_e) \end{cases}$	$66,2 \angle -120^\circ$ A	$58,3 \angle -120^\circ$ A	$46,1 \angle -120^\circ$ A
$\begin{cases} i_{am} = i_a(1 - G_e) \\ i_{bm} = i_b(1 - G_e) \end{cases}$	$38,2 \angle 150^\circ$ A	$33,7 \angle 150^\circ$ A	$26,6 \angle 150^\circ$ A

Kuten taulukon 7 tuloksista nähdään, virheet aiheuttavat joissakin tapauksissa suuret virhevektorit, jotka aiheuttavat varmasti suurta momenttivärähtelyä. On kuitenkin huomioitava, että tässä ei ole otettu virheiden kompensointia huomioon. Nykyaikainen moottorisäätö osaa kompensoida useita eri virhetyppejä ainakin osittain. Lisäksi virta-anturin virheitä voidaan kompensoida jo ennen kun virtatieto menee moottorisäädölle, jos virta-anturien epäideaalisuudet tunnetaan hyvin.

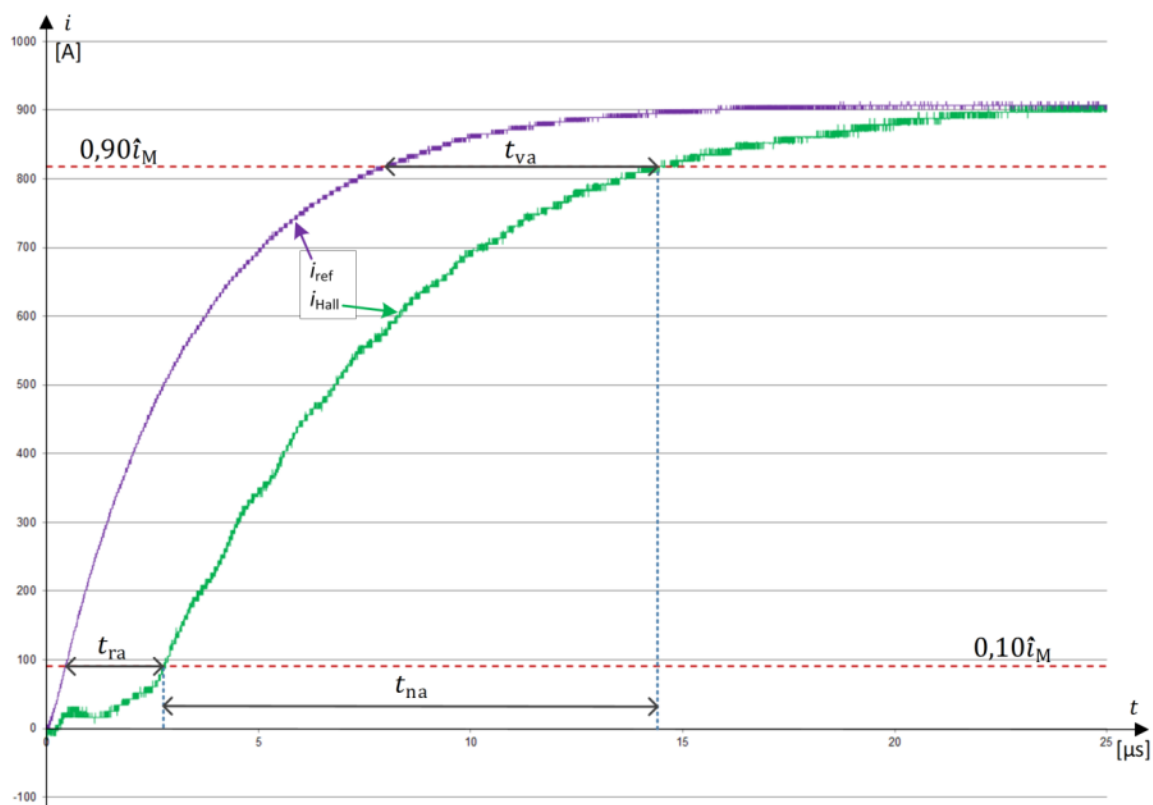
## 5.5 Dynaamisen suorituskyvyn mittaustulokset

Hall-anturin ja sunttielektroniikkojen dynaamista suorituskykyä tutkittiin luvussa 5.2 esitetyin menetelmin. Hall-anturin mittaustulokset ovat odotusten mukaiset, mutta suntin tulokset ovat yllättävän huonoja kummallakin elektroniikalla. Dynaamisen suorituskyvyn mittaustulokset on esitetty kuvissa 49 - 53. Mittaukset tehtiin  $16^\circ\text{C}$  lämpötilassa. Kaikissa dynaamisissa mittauksissa käytettiin oskilloskooppia Rohde & Schwarz RTO 1014. Mittauskaistanleveys on 200 MHz ja mittaussignaalin näytteistysväli 2,0 ns.

Kuvassa 49 on esitetty Hall-anturin käyttöjännitteen ja ulostulojännitteen mittaukset. On syytä muistaa, että nämä jännitteet ovat eri mittausten tulokset, sillä kuten luvussa 5.2 mainittiin, ei niitä voitu mitata yhtä aikaa suorilla jännitemittapäillä. Kuva 50 esittää kuvan 49 jännitteistä yhtälöllä (27) laskettua virtaa ja Rogowski-käämillä mitattua referenssivirtaa. Ajan nollakohta on kuvassa 50 eri kuin kuvassa 49, sillä kuvan 50 nollakohta on siirretty ylähaaran IGBT:n käänthetkeen. Lisäksi kuvan 50 käyristä on poistettu tallennusajan alussa havaitut nollapistepoikkeamat, jotka ovat referenssimittauksella  $-8,90$  A ja Hall-anturilla  $9,41$  A. Virtapulssin kesto on  $30\ \mu\text{s}$  ja sen amplitudi referenssimittauksen mukaan on  $904$  A. Virtapulssin keskimääräinen nousunopeus ( $di/dt$ ) on  $99,9\ \text{A} / \mu\text{s}$ . Referenssivirran mittausrésoluutio on  $5,93$  A ja Hall-anturin signaalin mittausrésoluutio on  $2,26$  A.



Kuva 49: Hall-anturin jännitesignaali ja käyttöjännite



Kuva 50: Hall-anturin dynaaminen suorituskyky ( $di/dt = 99,9 \text{ A} / \mu\text{s}$ )

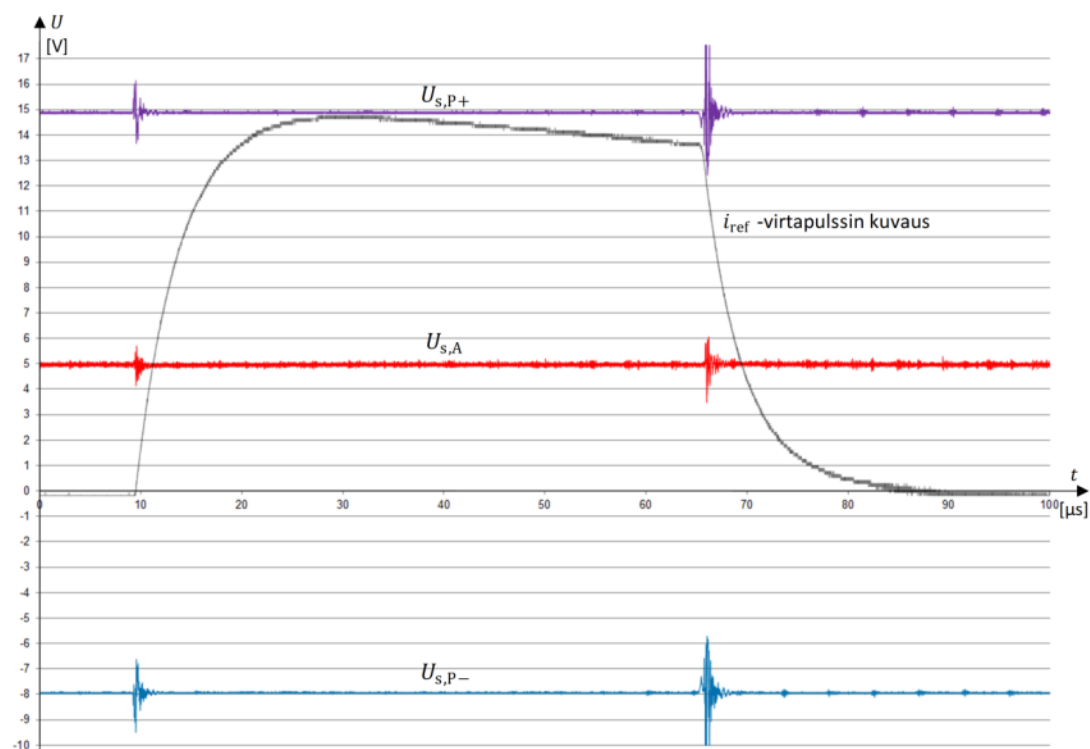
Hall-anturin dynaamisen suorituskyvyn yhteenveto on esitetty taulukossa 8. Kuten kuvasta 50 ja taulukosta 8 nähdään, Hall-anturin dynaaminen suorituskyky on hyvä.

Reagointi- ja nousuajalle ei ole asetettu vaatimusta, mutta vasteaikavaatimukseksi on asetettu 10  $\mu\text{s}$ . Tämän vaatimuksen Hall-anturi täyttää selvästi vasteajalla 6,18  $\mu\text{s}$ . Referenssivirran aikavakio on 3,43  $\mu\text{s}$ , jota vastaa taajuus 46,4 kHz. Hall-anturin datalehdessä saadaan vaihesiirto 46,4 kHz:n signaalille, joka on noin  $-66^\circ$ .

Taulukko 8: Hall-anturin dynaaminen suorituskyky

Suure	Arvo	Lisätieto
Virtapulssin amplitudi $\hat{i}_{\text{ref}}$	904 A	Mittausvirhe n. -5 A
Virtapulssin nousuaika $t_{\text{na,ref}}$	7,28 $\mu\text{s}$	Ka. 90,9 A $\rightarrow$ 818 A
Virtapulssin nousunopeus $di_{\text{ref}}/dt$	99,9 A / $\mu\text{s}$	Ka. 90,9 A $\rightarrow$ 818 A
Reagointiaika $t_{\text{ra}}$	2,33 $\mu\text{s}$	
Nousuaika $t_{\text{na}}$	11,3 $\mu\text{s}$	
Vasteaika $t_{\text{va}}$	6,18 $\mu\text{s}$	

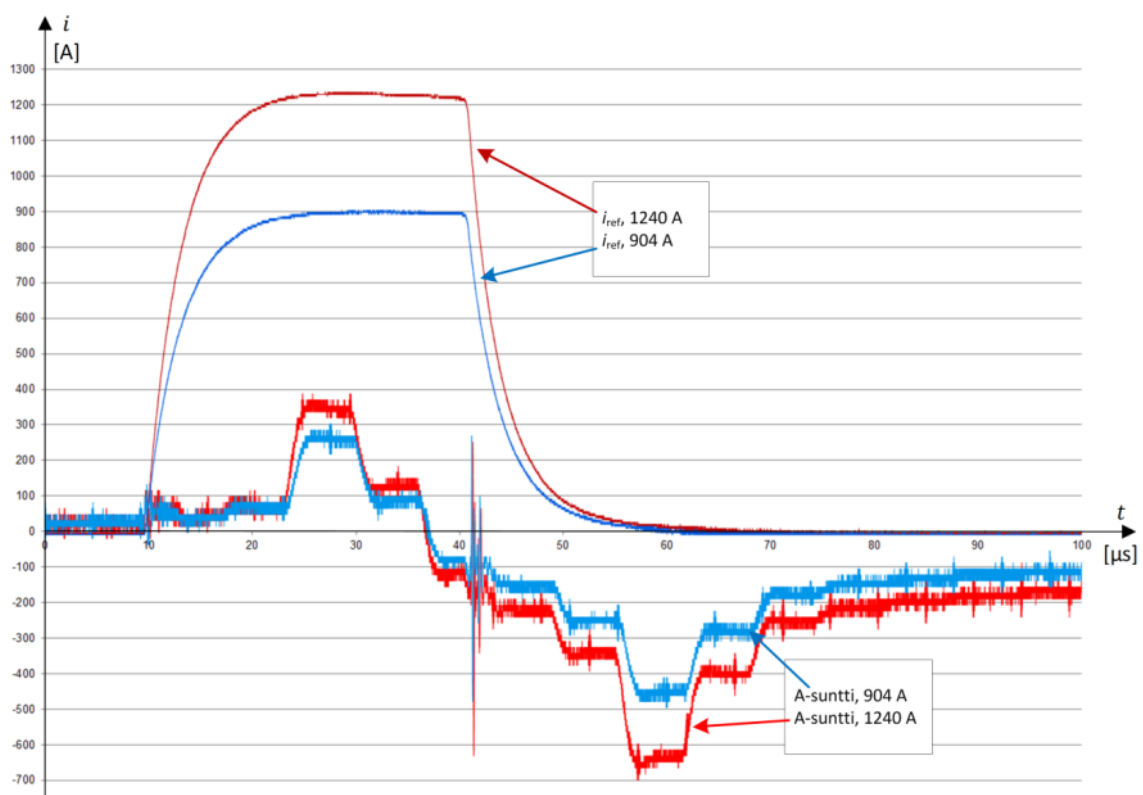
Liitteessä A taulukossa 15 on esitetty referenssimittauksessa käytetyn Rogowski-anturin kalibrointitiedot joista havaitaan, että kun virta on suurempi kuin 500 A, on referenssimittaus hieman epälineaarinen. Tämä voi vaikuttaa hieman nousu- ja vasteajan laskemiseen, mutta virhe on todennäköisesti alle sadan nanosekunnin luokkaa. Kalibrointitiedoista voidaan interpoloimalla arvioida 900 ampeerin mittaukselle noin  $-3,8$  ampeerin virhe. Lisäksi oskilloskoopin aiheuttama mittausvirhe referenssimittauksessa on  $\pm 0,26$  A. Hall-anturin käyttöjännitteen ja jännitesignaalin mittauksissa käytetyn oskilloskoopin virhe on  $\pm 37$  mV. Tämä aiheuttaa mittautulokseen virheen, joka on  $\pm 5,0$  A.



Kuva 51: Sunttielektroniikkojen käyttöjännitteiden stabiilius.  $U_{s,P+}$  ja  $U_{s,P-}$  ovat prototyyppielektroniikan käyttöjännitteet ja  $U_{s,A}$  on alkuperäisen elektroniikan käyttöjännite.  $i_{\text{ref}}$  kuvaa virtapulssia, mutta se ei ole todellinen virta.

Kuvassa 51 on esitetty suntin mittauselektroniikkapiirien käyttöjännitteiden stabiiliusmittauksen tulokset. Tavoitteena oli varmistaa, että käyttöjännite ei jää värähtelemään pitkäksi aikaa ja että värähtelyn amplitudi on kohtuullinen. Virtapulssin kesto on  $55 \mu\text{s}$  ja pulssin amplitudi on  $760 \text{ A}$ . Kuten kuvasta 51 havaitaan, käyttöjännitteet pysyvät stabiileina. Virtapulssin nousevalla reunalla havaitaan värähtelyä kaikissa käyttöjännitteissä. Alkuperäisen elektroniikan käyttöjännitteen värähtelyn amplitudi pysyy alle voltissa, mutta prototyyppielektroniikan käyttöjännitteen värähtelyn amplitudi on noin  $1,3 \text{ V}$  luokkaa. Värähtelyn olisi hyvä olla pienempää, mutta toisaalta sunttielektroniikkapiireillä on omat regulaattorit, joiden pitäisi pystyä säätämään sunttielektroniikkojen varsinaisia käyttöjännitteitä niin, että ne pysyvät riittävän stabiileina. Virtapulssin laskevan reunan värähtelyillä ei ole tämän työn mittauksissa merkitystä, sillä dynaamista suorituskkyä tutkitaan nousevalla reunalla.

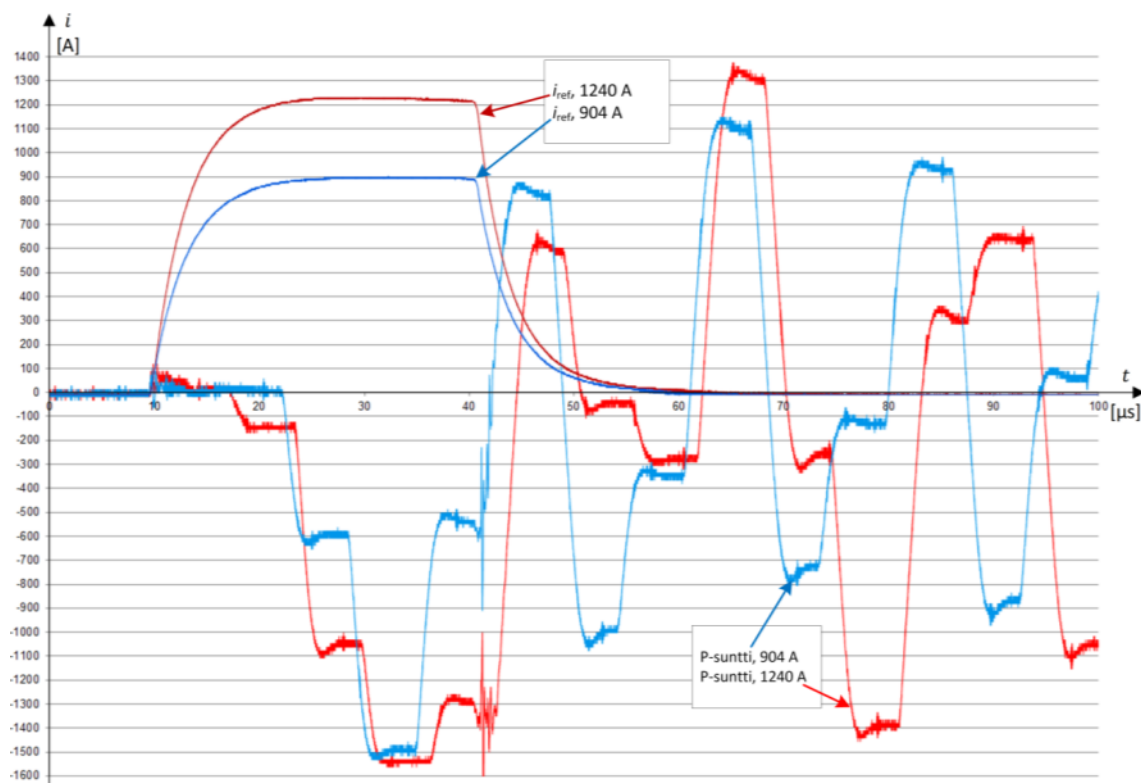
Mittausresoluutiot ovat  $30 \text{ mV}$  ( $U_{s,A}$ ),  $69 \text{ mV}$  ( $U_{s,P+}$ ) ja  $40 \text{ mV}$  ( $U_{s,P-}$ ). Alkuperäisen elektroniikan käyttöjännitteen mittausvirhe on  $\pm 37 \text{ mV}$  ja muiden käyttöjännitteiden mittausvirhe on  $\pm 65 \text{ mV}$ .



Kuva 52: Alkuperäisen sunttielektroniikan dynaaminen suorituskky eri virroilla

Kuvassa 52 on alkuperäisen sunttielektroniikan dynaaminen suorituskky  $904 \text{ A}$  ja  $1240 \text{ A}$  virtapulsseilla. Mittaus on tehty samoilla asetuksilla kuin aiemmin esitetyn Hall-anturin mittaukset. Vastaavasti kuvassa 53 on prototyyppielektroniikan suorituskky samoilla asetuksilla. Kuten näistä mittauksista havaitaan, suorituskky on niin huono, että reagointi-, nousu- ja vasteaikoja ei voida määrittää.

Suntin signaalien resoluutio on 15,2 A ja referenssimittauksen resoluutio on 5,93 A. Oskilloskoopin epätarkkuuden aiheuttama mittausvirhe alkuperäiselle sunttielektronikalle on 35,4 A ja prototyypielektronikalle mittausvirhe on 39,7 A. Lisäksi DA-muuntimen epätarkkuus on  $\pm 5$  %. Referenssimittauksen virhe 904 ampeerin mittauksessa on  $-3,8 \pm 0,26$  A ja 1240 ampeerin mittauksessa  $-5,3 \pm 0,26$  A.



Kuva 53: Prototyypisunttielektronikan dynaaminen suorituskky eri virroilla

Suntin dynaaminen suorituskky on huono, jos kuvien 52 ja 53 mittaustulokset ovat todellisia. Mahdollinen syy huonolle suorituskyyllle on mittauselektronikkapiirien esivahvistimien ja suntin liitosvetojen ja -pulttien muodostama silmukka. Tällöin voisi kuitenkin olettaa, että häiriö näkyisi vain virran nousevalla ja laskevalla reunalla. Toisin sanoen mittaustuloksen vääristymän pitäisi poistua kuvien 52 ja 53 aika-alueilla 20  $\mu$ s - 40  $\mu$ s ja 50  $\mu$ s - 100  $\mu$ s. Toinen mahdollinen syy on mittauselektronikkapiirien regulaattoreiden tekemän käyttöjännitteen häiriintyminen niin, että esimerkiksi vahvistimet tai  $\Delta\Sigma$ -modulaattorit sekoavat. Lisäksi on mahdollista, että elektronikkapiireillä on sellaisia kytkentöjä, jotka eivät kestä nopeita sähkö- tai magneettikentän muutoksia. Esimerkiksi kahden elektronikan liittäminen samaan sunttiin voi johtaa tilanteisiin, joissa elektronikat häiritsevät toisiaan.

Syy huonoon suorituskkyyn on todennäköisesti sunttielektronikan häiriintyminen. Tätä puoltaa se, että varsinkin alkuperäisen elektronikan mittaustuloksessa käyrämuoto pysyy vakiona eri virtapulsseilla, mutta sen amplitudi muuttuu. Sama on havaittavissa jossakin määrin prototyypielektronikan tuloksista. On toki mahdollista, että data-väylän  $\Delta\Sigma$ -signaalit häiriintyvät niin, että mittaussignaalit eivät kulje. Jos näin olisi, niin

mittaustuloksissa nähtäisiin luultavasti virtatiedon meneminen ääriarvoihin, sillä virtatiedon nollakohta on  $\Delta\Sigma$ -signaalin pulssisuhteen arvo 0,5. Näin ollen mittaussignaalin korruptoituminen on mittaustulosten perusteella epätodennäköistä. Sen sijaan, jos kellosignaali menetetään hetkellisesti, voi  $\Delta\Sigma$ -modulaattorin komparaattorin toiminta häiriintyä. Kuten luvussa 3.6 esitettiin, komparaattori on diskreetti ja toimii kellosignaalin tahdistamana. Toisaalta komparaattorin lähdön jumiutuminen kohonkin arvoon johtaisi myös pulssisuhteen ajautumiseen jompaankumpaan ääripäähän. Näytteistystaajuus on 20 MHz, joten komparaattorin näytteistysaikaaväli on 50 ns.

Eräs mahdollisuus on se, että FPGA-kortti on huonojen mittaustulosten syy. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä, sillä eri mittauselektronikoilta tulevat signaalit ovat hyvin erilaisia. Toki signaalityypit ovat erilaisia, mutta kuitenkin tuloksista nähdään, että signaalit näyttäisivät tulevan FPGA-kortille saakka. Lisäksi DA-muuntimet ovat samanlaisia molemmille signaaleille.

## 5.6 Tulosten yhteenveto

Staattisissa mittauksissa anturien suorituskyyvyt vaihtelivat. Kaikki testatut konseptit olivat hyviä absoluuttisen nollapistepoikkeaman suhteen. Ainoastaan suntin alkuperäinen elektronikka ei täytä nollapistepoikkeaman stabiiliusvaatimusta. Kaikki anturit täyttivät lineaarisuusvaatimuksen selvästi. Vahvistusvirhevaatimuksetkin täyttyvät kaikilla antureilla. On kuitenkin huomattava, että jos moottorisäätö ei kompensoi esimerkiksi 25 °C:een mittauksessa määritettyä vahvistusvirhettä, vahvistusvirhe ja sen muutos eri lämpötiloissa yhdessä johtavat liian suureen virheeseen.

Hall-anturin dynaaminen suorituskyyky on hyvä. Sen sijaan suntin molemmat mittauselektronikat ovat huonoja testatuissa dynaamisissa tilanteissa. Jotta tästä saadaan varmuus, on tehtävä lisätutkimuksia, joita ei tämän työn aikataulun puitteissa ole mahdollista tehdä. Tehtäviä lisämittauksia ovat

- mittauselektronikkapiirien analogisignaalien ja käyttöjännitteiden vakaus,
- $\Delta\Sigma$ -signaalien ja kellosignaalien häiriintyminen,
- pidempien virtapulssien ( $> 10$  ms) käyttö dynaamisissa mittauksissa signaalin stabiloitumisajan selvittämiseksi,
- FPGA-kortin toiminnan varmentaminen esimerkiksi signaaligeneraattoria käyttämällä ja
- erityyppisten virranmuutosten kokeilu (esimerkiksi muutos 20 prosentista 100 prosenttiin tai päinvastoin ja nousunopeuden hidastaminen nykyisestä).

Muita mittauksia, joita tässä työssä ei tehty ovat AC-virtamittaus esimerkiksi taajuusvasteen selvittämiseksi ja häiriötestit todellisessa suurivirtaisessa tasaähkömuuttaja- ja vaihtosuuntaajamoduulissa. Voidaan olettaa, että häiriöisessä ympäristössä suntti-



elektroniikkojen digitaalisignaalit ovat huomattavasti Hall-anturin analogista signaalia häiriösietoisempia.

Lisäksi käyttöjännitteen ajautumisen ja epästabiiliuden vaikutuksia on syytä tutkia. Ne jätettiin tässä työssä tekemättä, sillä tutkitut sunttielektronikat olivat vasta varhaisia prototyyppisiä. On suositeltavaa testata myös antureiden mekaanista kestävyyttä ja ominaisuuksien stabiiliutta asentamalla ne laitteeseen, jolle tehdään tärinä- ja elinikätestejä. Näin saadaan muun muassa komponenttien ikääntymisestä johtuvat muutokset selville.

Taulukossa 9 on esitetty eri vaatimusten täyttyminen. Merkintä ”LT” tarkoittaa sitä, että tarvitaan lisätutkimuksia joko siksi että ominaisuutta ei kyetty määrittämään tai tuloksesta ei ole täyttä varmuutta. Hall-anturin tapauksessa ”Muokaten” tarkoittaa sitä, että vaatimuksen täyttymiseksi on antureita kytkettävä kaksi rinnakkain. Tässä työssä ei oteta kantaa rinnankytkennän vaikutuksista muihin ominaisuuksiin.

Taulukko 9: Vaatimusten täyttyminen (LT: vaatii lisätutkimuksia)

Vaatus	A-suntti	P-suntti	Hall-anturi
Nimellinen mittausalue	Kyllä	Kyllä	Muokaten
Hetkellinen ylivirta	Kyllä	Kyllä	Muokaten
Minimikaistanleveys	LT	LT	Kyllä
Suosituskaistanleveys	LT	LT	Ei
Vasteaika	Ei, LT	Ei, LT	Kyllä
Nollapistepoikkeama	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Nollapistepoikkeaman stabiilius	Ei	Kyllä	Kyllä
Vahvistusvirhe	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Vahvistusvirheen stabiilius	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Lineaarisuusvirhe	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Lämpötila <sup>3</sup>	Kyllä, LT	Kyllä, LT	Kyllä
Suntin $\Delta t$ -vaatus	Kyllä	Kyllä	-

On syytä muistaa, että suhteelliset virheet on määritetty virta-anturin nimellisen mittausalueen mukaan. Sähkökäytössä vertailukohtana on käytettävä moottorin nimellistä virtaa. Jos moottorin nimellisvirta on paljon pienempi kuin anturin nimellisvirta, eivät vaatimukset välttämättä enää täytykään. Esimerkiksi suntin alkuperäinen elektroniikka ei täytä vahvistusvirhevaatimusta, jos moottorin nimellisvirta on pienempi kuin 736 A<sub>RMS</sub>. On kuitenkin huomioitava se, että tässä työssä tutkittu suntti on vain esimerkki, jonka nimelliseksi mittausalueeksi vaadittiin 900 A<sub>RMS</sub>. Luonnollisesti on järkevää mitoittaa koko tehoelektroniikkamoduuli virta-antureineen myös selvästi mainittua virtaa pienemmille moottoreille, jos moduuli tehdään myös sellaisiin sovelluksiin.

<sup>3</sup> Hall-anturin lämpötilavaatimukset täyttyvät datalehden mukaan. Suntin elektroniikkapiirien lämpötilaa ei ole tutkittu kunnolla. Havaittiin, että suntti toimi kun kisko oli lämmitetty 105 °C:seen. Tämä havainto tehtiin kuitenkin nollavirralla. Virtaa tässä lämpötilassa kulki suntin läpi vain korkeintaan noin kolmen sekunnin ajan. On selvítettävä, toimiiko suntti jatkuvalla virralla, kun ympäristö on 90 °C ja kisko on 105 °C.

## 6 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin suntin käyttöä virta-anturina raskaissa työkonesähkökäytöissä. Virta-anturia käytettäisiin suuritehoisissa pienjännitteisissä tasa- ja vaihtosuuntaajissa ja tasasähkökatkoissa. Tarkoitus oli tehdä tutkimus siitä, onko suntti mahdollinen vaihtoehto kompensoimattomalle Hall-anturille. Tutkimus tehtiin pääasiassa mitaamalla erään suntin ja Hall-anturin staattista ja dynaamista suorituskkyä. Suntiin oli liitetty alkuperäisen mittauselektroniikan lisäksi eri valmistajan prototyypimittaus-elektroniikka.

Työssä esiteltiin virranmittauksen tarkoitusta ja virtatiedon käyttöä muun muassa moottorisäädössä ja tasasähkömuuttajan kaskadisäädössä. Lisäksi työssä esiteltiin kompensoidun ja kompensoimattoman Hall-anturin ja sunttivirta-anturin toimintaperiaatteet. Myös fluxgate-anturin toimintaperiaate esiteltiin lyhyesti. Virta-anturin signaalin häiriintymistä anturin ja ohjauselektroniikan välillä käsiteltiin ja eräänä esimerkkinä häiriösietoisesta tiedonsiirtomenetelmästä esiteltiin  $\Delta\Sigma$ -modulaatioon perustuva AD-muunnos. Työssä esiteltiin myös anturien epäideaalisuuksia ja niiden vaikutuksia moottorin momenttisäätöön.

Työssä tehtiin useita staattisen suorituskyyvyn mittauksia. Virta-antureiden nollapistepoikkeamaa tutkittiin lämpötilan funktiona  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  välillä. Lisäksi anturien vahvistusvirhettä ja lineaarisuutta tutkittiin. Hall-anturi oli staattisissa mittauksissa kokonaisuudessaan paras virta-anturi. Kuitenkin suntin molemmat mittaus-elektroniikat pärjäsivät Hall-anturille hyvin. Ennen mittauksia oletettiin, että suntin terminaalien välinen epätasainen lämpenemä olisi suuri ongelma suntin suorituskyyvylle. Mittaukset kuitenkin osoittivat, että näin ei ole.

Hall-anturin dynaaminen suorituskky on hyvä. Sen sijaan tämän työn tulosten perusteella suntin kumpikaan elektroniikka ei suoriudu mittauksesta lainkaan  $100\text{ }\mu\text{s}$  aika-alueella. Jotta tästä voidaan olla varmoja, täytyy sunttia tutkia lisää. Ensinnäkin on varmistettava, että huonojen tulosten syy ei ole digitaaliseen suodatukseen ja DA-muunnokseen käytetty FPGA-kortti. Todennäköisin syy on analogielektroniikan signaalien tai suntin regulaattoreiden tuottaman käyttöjännitteen häiriintyminen. Lisäksi on varmistettava, että suntin dataväylän signaalit eivät häiriinny liikaa.

Tämän työn tulosten perusteella tutkituista antureista kompensoimaton Hall-anturi on paras. Merkittävin rajoitus on sen rajallinen mittausalue, jolloin Hall-antureita on kytkettävä kaksi rinnakkain. Vaikka suntin suorituskky on joissakin mittauksissa erittäin huono, on muistettava se, että suntti ja sen molemmat mittauselektroniikat ovat hyvin varhaisia prototyyppejä. On myös syytä muistaa, että tässä työssä anturien mittaussignaalien häiriintymistä ei tutkittu todellisessa ympäristössä. Hall-anturin analoginen mittaussignaali vääristyy todennäköisesti huomattavasti suntin digitaalista signaalia enemmän. Näin ollen suntti on lähitulevaisuudessa potentiaalinen virta-anturi-

ratkaisu raskaisiin työkonesähkökäyttöihin. Lisäksi on mahdollista, että lähitulevaisuudessa voi olla saatavilla myös kompensoituja Hall-antureita tämän työn sovellusten vaatimiin käyttöolosuhteisiin.

## Lähdeluettelo

- [1] J. M. Miller, Propulsion systems for hybrid vehicles 2nd edition (e-book), 2. toim., London: The Institution of Engineering and Technology, 2010, pp. 71 - 74.
- [2] M. Ehsani, Y. Gao ja A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Lontoo: CRC Press, 2010, pp. 259 - 264, 478 - 479.
- [3] J. Luomi, Control of Electric Drives Addenda, Aalto University School of Electrical Engineering, 2011, pp. 40 - 45.
- [4] T. Muhonen, Energiavarastojen tehon ohjaus hybridivoimansiirrossa, Diplomityö, Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2008, pp. 12 - 13, 22.
- [5] J. Pyrhönen, Electrical Drives 2010...2011 Lecture Notes, Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2010, pp. 5.12 - 5-16, 11.25 - 11.47.
- [6] ABB Oy, ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, osa/vuosik. 18. Sähkömoottorikäytöt, 2000, p. 26.
- [7] ABB Oy Drives, Technical guide No. 1 Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology, Rev C toim., 2011, pp. 28 - 31.
- [8] T. J. Vyncke, K. R. Boel ja J. A. Melkebeek, Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors – An Overview, Ghent: 3rd IEEE Benelux Young Researchers Symposium In Electrical Power Engineering, 2006.
- [9] L. Laurila, P. Kurronen, M. Niemelä ja J. Pyrhönen, Effect of unideal current sensors in direct torque controlled PMSM drives, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, Stockholm, Sweden, August 2002.
- [10] M. Hinkkanen, ”Control of PMSM drives (Kurssin S-17.3050 Special Course on Electromechanics P luentomateriaali, luento 11),” Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Espoo, 2012.
- [11] A. A. Adam ja K. Gulez, Torque Control of PMSM and Associated Harmonic Ripples, Torque Control, Prof. Moulay Tahar Lamchich (Ed.), InTech, 2011, pp. 163 - 165, 169.
- [12] N. Mohan, T. M. Undeland ja W. P. Robbins, Power Electronics, 3. toim., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 46 - 57, 337 - 340.
- [13] O. Niiranen, Jännitettä laskevan hakkurin siirtofunktiomallin simulointi ohjauksen suunnittelun näkökulmasta, Kandidaatintyö, Espoo: Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, 2011, p. 9.
- [14] J.-P. Kittilä, Asiantuntijahaastattelu virta-anturille asetettavista vaatimuksista, ABB Oy Drives, Helsinki, 3.10.2013.
- [15] O. Aumala, Mittaustekniikan perusteet, Helsinki: Yliopistokustannus/Otatieto 1989, 2000, pp. 143 - 146.
- [16] L. Laurila, Analysis of Torque and Speed Ripple Producing Non-Idealities of Frequency Converters in Electric Drives, Väitöskirja, Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2004, pp. 23, 34 - 41, 45 - 55, 69 - 73.

- [17] LEM, Isolated current and voltage transducers Characteristics - Applications - Calculations, 3rd Edition toim., LEM, 2012, pp. 9 - 21, 25 - 33.
- [18] L. Laurila, J. Pyrhönen ja M. Niemelä, Torque ripple in DTC PMSM drives due to nonlinearity of current sensors, Lappeenranta University of Technology: EPE, Toulouse, France, September 2003.
- [19] I. Lindell ja A. Sihvola, Sähkömagneettinen kenttäteoria 1. Staattiset kentät, Kuudes painos toim., Helsinki: Otatieto / Gaudeamus, Helsinki Univeristy Press, 2007, pp. 204 - 206.
- [20] J. Luomi ja A. Niemenmaa, Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt osa 1, kurssin S-17-2020 luentomoniste, Espoo: Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan laitos, 2010, pp. 8 - 15.
- [21] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H.-C. Iu ja L. J. Borle, Current Sensing Techniques: A Review, IEEE Sensors Journal, Vol 9., 2009.
- [22] J. Niiranen, Tehoelektroniikan komponentit, 4. toim., Helsinki: Otatieto, Gaudeamus Helsinki University Press, 2007, pp. 224 - 225.
- [23] Honeywell, Hall Effect Sensing and Application, Freeport, Illinois: Micro Switch Sensing and Control, Honeywell Inc., 1998, pp. 3 - 4, 38 - 41.
- [24] LEM, Automotive Current Transducer LEM HAH1DR 900-S Datasheet, 2009.
- [25] Isabellenhütte Heusler GMBH & CO., Low-Ohmic Precision and Power Resistors, 2013.
- [26] W. Pettigrew, CTO, Raztec Sensors, Power Electronics Europe, nro 2, 2008, pp. 26 - 28.
- [27] A. M. Patel, Current Measurement in Power Electronic and Motor Drive Applications - A Comprehensive Study, Diplomityö, University of Missouri-Rolla, 2007, pp. 54 - 58.
- [28] E. Favre ja W. Teppan, Current Sensing in Electric Drives - A Future and History Based on Multiple Innovations, LEM Group, Switzerland, 2005.
- [29] J. Niiranen, Sähkösäätötekniikan digitaalinen ohjaus, Helsinki: Yliopistokustannus/Otatieto, 1999, pp. 262 - 263.
- [30] B. Baker, How delta-sigma ADCs work, Part 1, Texas Instruments, Incorporated, 2011.
- [31] M. Oljaca ja T. Hendrick, Combining the ADS1202 with an FPGA Digital Filter for Current Measurement in Motor Control Applications, Application Report, Texas Instruments, 2003.
- [32] B. Baker, How delta-sigma ADCs work, Part 2, Texas Instruments, Incorporated, 2011.
- [33] M. Vertanen, Asiantuntijahaastattelu moottorisäädön virranmittaukselle asettamista vaatimuksista, ABB Oy Drives, Helsinki, 16.9.2013.
- [34] PEM, CWT Specification, 2010.

## Liite A: Mittalaitteet

Tässä liitteessä on esitetty käytetyt mittalaitteet ja niiden tärkeimmät ominaisuudet.



Kuva 54: Tiedonkeruulaite ja sen multiplekseri. Staattisissa mittauksissa käytettiin tiedonkeruulaitteita Agilent 34972A (kuvassa) ja 34970A (LXI Data Acquisition / Switch Unit) yhdessä multiplekserin Agilent 34901A kanssa. 34972A ja 34970A ovat saman laitteen eri versioita. Näiden tarkkuus ja muu suorituskyky ovat samat.

Taulukko 10: Agilent-mittalaitteiden kalibroinnit

Mittalaite	Kalibroitu
Agilent 34972A	1.3.2013
Agilent 34970A	20.3.2013
Agilent 34901A	9.7.2013

Taulukko 11: Tiedonkeruulaitteen tarkkuus (Agilent 34972A tai Agilent 34970A ja Agilent 34901A)

Suure ja mittausalue	Virhe
100 mV <sub>DC</sub> mittausalue	0,32 %
10 V <sub>DC</sub> mittausalue	0,0041 %
100 V <sub>DC</sub> mittausalue	0,0085 %
Lämpötila J-tyyppin termoparilla	1,0 °C

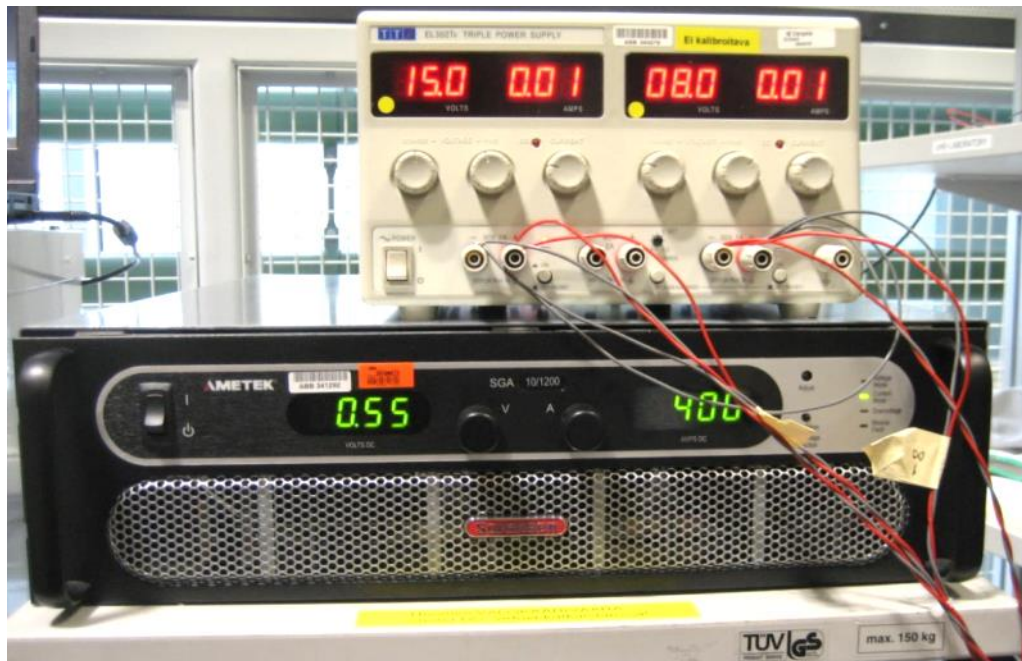


Kuva 55: Referenssisuntti HILO Test WSM 1500

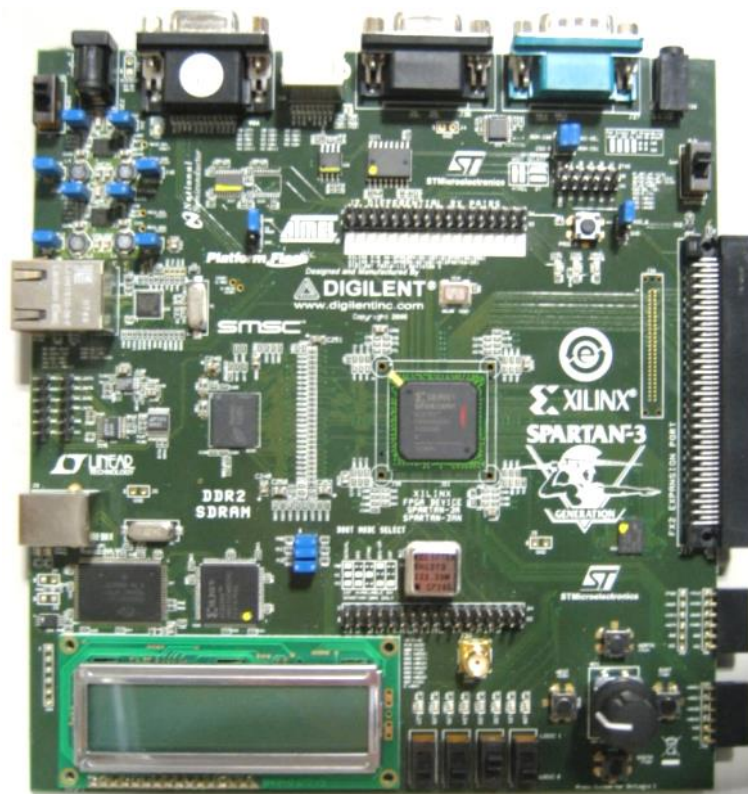
Taulukko 12: Referenssisuntti

Suntin ominaisuudet	
Nimellinen virta	1500 A <sub>RMS</sub>
Resistanssi	40 $\mu\Omega$
Kaistanleveys	200 kHz
Ulostulojännite	40 $\mu\text{V}$ / A (60 mV / 1500 A)
Kalibrointi 8.3.2013	Virhe
10 A <sub>DC</sub>	0,1 $\mu\text{V}$ (2,5 mA)
100 A <sub>DC</sub>	0,5 $\mu\text{V}$ (12,5 mA)
Resistanssin toleranssi (valmistajan ilmoittama)	< 0,5 %





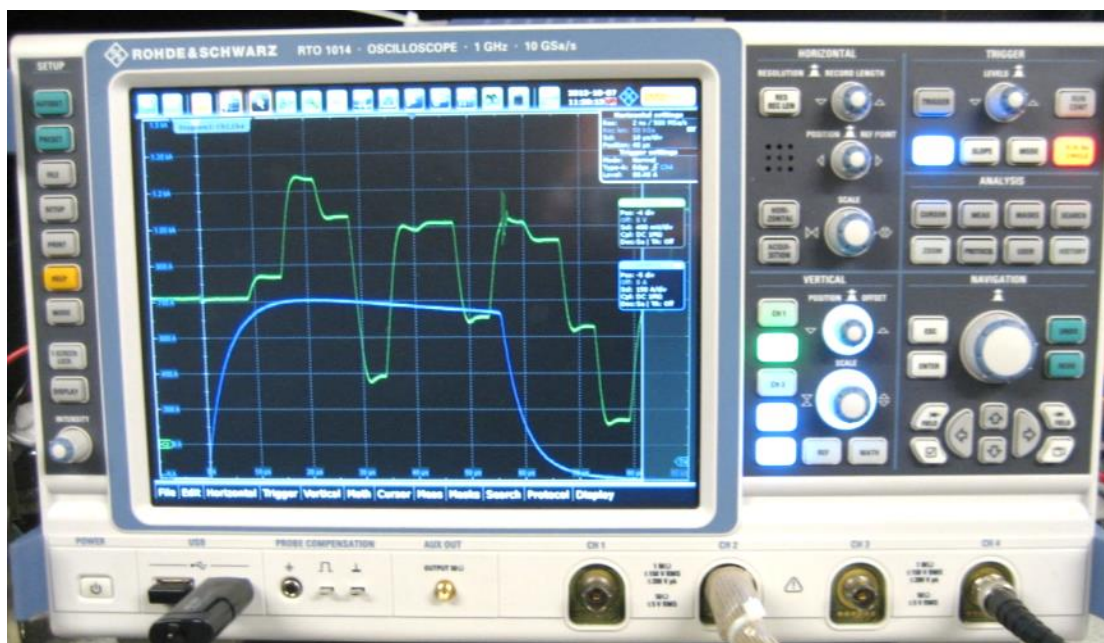
Kuva 56: 1200 A tasavirtalähde Ametek SGA 10/1200 ja tasajännitelähde TTI EL302Tv. Kuvan tasajännitelähdettä käytettiin prototyyppielektronikan käyttöjännitelähteenä. Kalibrointitietoja ei tässä esitetä, sillä käyttöjännitteet ja testivirta mitattiin kalibroiduilla mittalaitteilla.



Kuva 57: FPGA-kortti Digilent Spartan 3

Digilent Spartan 3 -alustan DA-muuntimen referenssijännitteen toleranssiksi on datalehdessä annettu  $\pm 5\%$ .





Kuva 58: Rohde & Schwarz RTO 1014

Taulukko 13: Rohde & Schwarz RTO 1014 -oskilloskoopin kalibrointitiedot

Kalibrointi 23.8.2013	Virhe
1 V / div. -mittausalue	$\pm 37$ mV
3 V / div. -mittausalue	$\pm 65$ mV
Referenssivirtamittaus	$\pm 0,57$ mV ( $\pm 0,26$ A)



Kuva 59: Testec TT-HF 512

Taulukko 14: Suora jännitemittapää Testec TT-HF 512

Suure	Arvo
Vaimennus	10:1
Impedanssi	$10\text{ M}\Omega \parallel 9\text{ pF}$
Kaistanleveys	Nousuaika $< 0,7$ ns



Kuva 60: Rogowski-käämi PEM CWT [34]

Taulukko 15: PEM CWT 15R virta-anturin tiedot. Taulukon lopussa on käytettyjen mittauspisteiden arvioidut virheet, jotka on laskettu interpoloimalla kalibrointimittaustietoa.

Suure	Arvo
Herkkyys	2,0 mV / A
Virta-alue (huippuvirta)	3,0 kA
$di/dt$ (maksimi)	20,0 kA / $\mu$ s
Päästökaista (-3 dB)	0,8 Hz - 16 MHz
Kalibrointi 23.5.2013	Virhe
300 A	0,35 A
500 A	0,37 A
1000 A	-4,78 A
2000 A	-6,78 A
Laskennalliset pisteet	Virhe
900 A	-3,75 A
1240 A	-5,26 A